

ESTIMATIVA DE UM ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO ÀS ONDAS NA ZONA COSTEIRA DA ILHA DE SANTA CATARINA: Uma proposta metodológica

Samuel Andrade Segatto

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E
AMBIENTAL**

Samuel Andrade Segatto

**ESTIMATIVA DE UM ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO ÀS ONDAS NA
ZONA COSTEIRA DA ILHA DE SANTA CATARINA:
UMA PROPOSTA METODOLÓGICA**

Florianópolis - SC

2011

Samuel Andrade Segatto

**ESTIMATIVA DE UM ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO ÀS ONDAS NA
ZONA COSTEIRA DA ILHA DE SANTA CATARINA: UMA
PROPOSTA METODOLÓGICA**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental para a obtenção do Grau de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

Coorientador: Dr. Rodrigo do Carmo Barletta

Florianópolis - SC

2011

Samuel Andrade Segatto

ESTIMATIVA DE UM ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO ÀS ONDAS NA
ZONA COSTEIRA DA ILHA DE SANTA CATARINA: UMA
PROPOSTA METODOLÓGICA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado aprovado para a obtenção do título de "Engenheiro Sanitarista e Ambiental", e aprovado em sua forma final pelo Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis - SC, 13 de julho de 2011.

Prof. Dr. Henrique de Melo Lisboa
Coordenador do Curso

Prof. Dr. Davide Franco
Orientador

Dr. Rodrigo do Carmo Barletta
Coorientador

Banca Examinadora:

Prof^ª. Dr^ª. Regina Rodrigues Rodrigues

Prof. Dr. Sergio R. Floeter

A Deus, que em tudo me abençoa e guarda, por ter misericórdia de mim e me conceder amor, sabedoria e paz. Aos Segatto, em especial, meu pai Antônio, minha amiga Anselma e minha irmã Melissa, pelo apoio incondicional. À minha mãe, Rosângela (*in memorian*), poderoso alicerce de meu caráter. Aos Valverde, amigos e irmãos em Cristo, pelo encorajamento e ajuda espiritual. Aos professores e companheiros de trabalho, por me emprestarem seu conhecimento, bom humor e paciência. À comunidade global de GNU/Linux, pela economia de experiência.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Prof. Dr. Davide Franco e ao Dr. Ocean. Rodrigo do Carmo Barletta pelas horas dedicadas no ensino da utilização do REF/DIF. Aos professores Dr. Antônio Carlos Ribeiro Nogueira e Dr. Altamir Dias pelo incentivo do uso de *software* livre neste trabalho. À Eng. Júlia Costa, por disponibilizar os dados de relevo submerso utilizados. Aos integrantes dos laboratórios: LaHiMar e GTHidro.

*Dai-me Senhor, a perseverança das ondas
do mar, que fazem de cada recuo um ponto
de partida para um novo avanço.*

Gabriela Mistral (1889-1957).

RESUMO

O presente trabalho quantificou a exposição da costa da Ilha de Santa Catarina à energia das ondas, estimando um índice que representa processos de refração, difração e empinamento na zona costeira. Para isto foram utilizadas *rotinas computacionais* e um modelo de refração e difração de onda (REF/DIF1). Buscou-se estimar um índice coerente, podendo ser utilizado para relacionar comunidades ecológicas com a energia hidrodinâmica das ondas, e também na construção de cenários de modelagem ambiental; estudos de distribuição, abundância, forma e reprodução de espécies costeiras e, ainda, no auxílio do planejamento e gerenciamento costeiro sensível ao ecossistema litorâneo.

Palavras-chave: índice de exposição às ondas. modelos parabólicos de refração e difração. energia de onda. Generic Mapping Tools

ABSTRACT

This study quantified the exposure of the coast of Santa Catarina Island to the wave energy, estimating an index that represents processes of refraction, diffraction and shoaling in the near-shore. For this, we used computational algorithms and a model of wave refraction and diffraction (REF/-DIF1). We tried to estimate a consistent wave exposure index that can be used to relate ecological communities with the hydrodynamic energy of waves, and also to build scenarios of ecological modeling, in studies of distribution, abundance, shape and reproduction of coastal species and also aid in coastal planning and management to the preservation of the near-shore ecosystem.

Keywords: wave exposure index. parabolic models of refraction and diffraction. wave energy. Generic Mapping Tools.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Energia das ondas no oceano.	15
Figura 2	Geração de ondas por eventos climatológicos.	16
Figura 3	Perfil de uma onda idealizada.	17
Figura 4	Propagação de uma onda.	19
Figura 5	Refração de ondas em uma praia.	20
Figura 6	Difração de ondas em um quebra-mar.	20
Figura 7	Superfície complexa do oceano.	21
Figura 8	Espectro de onda para mares completamente desenvolvidos. .	22
Figura 9	Localização espacial da Ilha de Santa Catarina.	26
Figura 10	<i>clustering</i> de sistemas de onda.	31
Figura 11	Organograma da metodologia aplicada.	32
Figura 12	Mosaico de pontos das cartas náuticas disponíveis.	34
Figura 13	Confecção do algoritmo de fronteira.	35
Figura 14	Área para cálculo da propagação.	37
Figura 15	Controle na interpolação da batimetria.	38
Figura 16	Batimetria representativa à Grade1.	39
Figura 17	Batimetria representativa à Grade2.	40
Figura 18	Batimetria representativa à Grade3.	41
Figura 19	Batimetria representativa à Grade4.	42
Figura 20	Batimetria representativa à Grade5.	46
Figura 21	Mapa de <i>H_s unitária</i> emA.	48
Figura 22	Mapa de <i>H_s unitária</i> emB.	49
Figura 23	Mapa de <i>H_s unitária</i> emC.	55
Figura 24	Mapa de <i>H_s unitária</i> emE.	56
Figura 25	Mapa de <i>H_s</i> , cenário emA.	57
Figura 26	Mapa de <i>H_s</i> , cenário emB.	58
Figura 27	Mapa de <i>H_s</i> , cenário emC.	59
Figura 28	Mapa de <i>H_s</i> , cenário emE.	60
Figura 29	Ilha de Santa Catarina, cenário emA.	61
Figura 30	Ilha de Santa Catarina, cenário emB.	62
Figura 31	Ilha de Santa Catarina, cenário emC.	63
Figura 32	Ilha de Santa Catarina, cenário emE.	64

Figura 33	Índice de exposição às ondas $H_{s_{anual}}$	65
Figura 34	Índice de exposição às ondas ϕ_{anual}	66
Figura 35	Histogramas de frequência relativa.....	67
Figura 36	Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 10m.....	68
Figura 37	Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 20m.....	68
Figura 38	Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 30m.....	69
Figura 39	Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 40m.....	69
Figura 40	Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 50m.....	70
Figura 41	Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 60m.....	70
Figura 42	Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 10m.....	71
Figura 43	Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 20m.....	71
Figura 44	Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 30m.....	72
Figura 45	Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 40m.....	72
Figura 46	Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 50m.....	73
Figura 47	Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 60m.....	73
Figura 48	Exemplo do I.E. ϕ em pontos na zona costeira.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Identificação do modelo REF/DIF1	24
Tabela 2	Características dos cinco sistemas.	28
Tabela 3	Características de fronteira de cada grade.....	36
Tabela 4	Características das malhas discretizadas.....	43
Tabela 5	Composição dos cenários.	44
Tabela 6	Variáveis de configuração do REF/DIF1.....	45
Tabela 7	Parâmetros utilizados	47
Tabela 8	Contribuição Sazonal (%).	51
Tabela 9	Contribuição Sazonal Redistribuída (%).	51
Tabela 10	Valor do índice para algumas localidades.	74

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	p. 13
1.1 Objetivos	p. 14
1.2 Finalidade	p. 14
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	p. 15
2.1 Teoria geral das ondas	p. 16
2.1.1 Teoria linear da ondas	p. 16
2.1.2 Processos físicos relevantes	p. 18
2.2 Espectro de energia das ondas	p. 20
2.3 Modelo computacional de refração e difração de onda	p. 22
2.3.1 Características de cálculo	p. 23
2.3.2 Limitações do modelo	p. 24
2.4 Caracterização da área de estudo	p. 25
2.5 Regime de ondas	p. 25
2.5.1 Regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina	p. 26
2.5.2 Caracterização dos estados de mar	p. 27
2.5.3 Espectro de energia multimodal	p. 27
2.5.4 Sistemas de onda	p. 28
2.6 Índice de Exposição às Ondas	p. 28
3 METODOLOGIA	p. 32
3.1 Tratamento dos dados batimétricos	p. 33
3.1.1 Escolha da área de modelagem	p. 33
3.1.2 Amostragem da batimetria	p. 35
3.2 Preparação para o <i>input</i> do REF/DIF1	p. 35
3.2.1 Interpolação dos pontos de batimetria	p. 37
3.2.2 Estruturação das malhas batimétricas	p. 42
3.2.3 Estruturação dos cenários	p. 43
3.2.4 Estruturação do <i>indat.dat</i>	p. 44
3.3 Pós-processamento do <i>output</i>	p. 50
3.4 Formulação e cálculo do índice de exposição às ondas	p. 50
3.4.1 Índice H_s (média ponderada)	p. 52
3.4.2 Índice ϕ (fluxo de energia)	p. 52
3.5 Resultados	p. 53
4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	p. 75

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno das ondas é comum na natureza. Dentre os vários tipos existentes, estamos mais familiarizados com as ondas que se propagam no ar e na água. De maneira geral podemos dividi-las em duas grandes categorias segundo sua forma de transmissão: as ondas de corpo e as **ondas superficiais** (LIN, 2008). Enquanto as ondas de corpo se propagam em um único meio, as de superfície sempre aparecem na interface entre dois meios; a exemplo das ondas oceânicas, na interface oceano atmosfera.

As ondas que identificamos na superfície dos oceanos são ondas mecânicas geradas principalmente pela força motriz dos ventos, astronômicas e movimentação da crosta terrestre. A origem dessas ondas tem a participação da gravidade e da capilaridade, que agem como forças restauradoras do nível do mar (STOKER, 1992).

O estudo das ondas oceânicas de superfície é de relevância social, econômica e ambiental, pois a sociedade desenvolve diversas atividades no ambiente marinho, muitas delas impactantes ao meio, se utilizando da componente física (hidrodinâmica) e ecológica (organismos) destas ondas. Esse contexto, absorve o profissional de engenharia sanitária e ambiental, atuando no auxílio do planejamento e gerenciamento costeiro, visando a preservação do ecossistema litorâneo.

A engenharia aborda o estudo de **ondas superficiais** oceânicas através da modelagem computacional. Esta modelagem se difere na **zona costeira** (*nearshore*) e ao largo da costa (*offshore*) (LIN, 2008). Isto se deve ao fato das ondas sofrerem transformações complexas pela combinação dos processos de empolamento, refração, difração e quebra, oriundos da mudança brusca na topografia de fundo em águas rasas (*shallow water*).

Como consequência do processo físico das ondas oceânicas superficiais, estas influenciam a morfodinâmica da **zona costeira** tanto quanto é exposta à energia das ondas; porém, como quantificar esta influência de forma útil?

A representação da exposição às ondas pode ser feita através de um índice (THOMAS, 1985), que sintetize a morfologia da plataforma continental adjacente, juntamente com seu **regime de onda**, proporcionando a análise de como o conteúdo energético deste processo físico se distribui espacialmente ao largo de uma determinada região.

1.1 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como objetivo geral avaliar a exposição da costa da Ilha de Santa Catarina, SC à energia das ondas, estimando o índice que representa este processo na zona costeira.

São, ainda, objetivos específicos deste trabalho:

- Calcular a altura significativa de onda propagada em água rasa e analisar como o fluxo de energia de onda se distribui espacialmente ao largo da ilha;
- Construir um algoritmo de sobreposição das malhas de diferentes sistemas de onda;
- Propor uma metodologia de cálculo do índice de exposição às ondas que utilize *software livre*;
- Relacionar o nível de energia hidrodinâmica com linhas isóbatas da zona costeira.

1.2 FINALIDADE

Este trabalho tem por finalidade proporcionar a efetiva quantificação das condições de ondas na zona costeira da Ilha de Santa Catarina, através do índice de exposição às ondas, que por sua vez pode ser utilizado para:

1. Relacionar comunidades ecológicas com a energia hidrodinâmica das ondas;
2. Construir cenários de modelagem ambiental, estudos de distribuição, abundância, forma e reprodução de espécies costeiras;
3. Auxiliar no planejamento e gerenciamento costeiro sensível ao ecossistema marinho.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

As ondas oceânicas são perturbações, causadas pelo movimento de energia por uma ou mais fontes geradoras, portanto, transmitem apenas energia e não massa através da superfície do oceano. A maioria das ondas oceânicas de superfície são causadas pelo vento.

A Figura 1 (THURMAN, 1997) nos mostra que a maior parte da energia processada pelas ondas no oceano é proveniente de ondas geradas pelo vento.

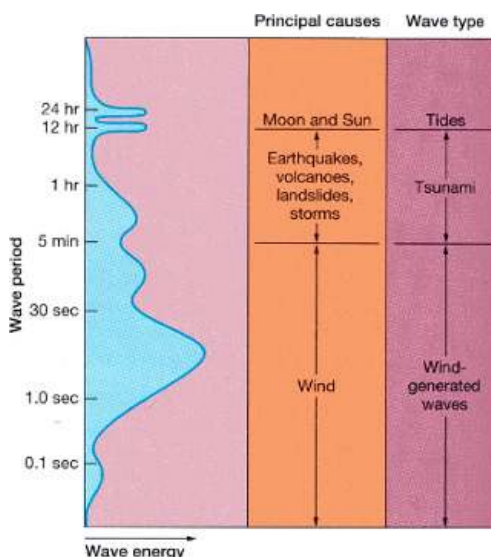


Figura 1 – Energia de onda em função do seu período e seus sistemas geradores (THURMAN, 1997).

A energia das ondas é transmitida por seu movimento cíclico, que transcorre em sua forma e características; desta maneira, o estudo do processo físico das ondas historicamente foi iniciado por teorias que buscavam explicar este movimento.

Alguns marcos históricos são elencados por Dean & Dalrymple, entre eles destacam-se: a elaboração da teoria de ondas lineares por Airy em 1845, continuada com as teorias de Stokes em 1847, Boussinesq em 1872 e o teorema do limite de altura de onda de Michell em 1893 e McCowan em 1894.

2.1 TEORIA GERAL DAS ONDAS

A maior parte das ondas marinhas são geradas pelo vento através da transferência energia devido ao atrito (MADER, 2004). O efeito do vento e das tensões criadas na superfície livre do oceano gera comprimentos de onda muito curtos, da ordem de *cm*, chamadas ondas capilares, restauradas pela tensão superficial da água.

A constante perturbação e restauração da superfície oceânica pode desenvolver-se progressivamente, e são geradas então ondas gravíticas, incrementando a transferência de energia, aumentando de altura, comprimento e velocidade.

A formação de ondas então, está relacionada também com eventos climatológicos. A Figura 2 exemplifica a geração de ondas por uma tempestade. Conforme o tipo, intensidade e duração do evento gerador, podem ser geradas ondas de características diferentes.

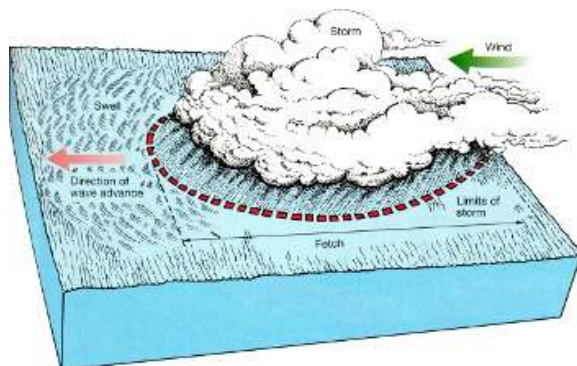


Figura 2 – Esquema de geração de ondas: ondulações e vagas criadas por ventos em uma tempestade (THURMAN, 1997).

2.1.1 Teoria linear da ondas

Atualmente as ondas, de forma geral, são descritas fisicamente com base em modelos teóricos, Figura (3).

Uma onda idealizada tem como principais termos: **altura significativa de onda** (H), que representa seu deslocamento vertical; amplitude (a), correspondendo a $H/2$ e o comprimento de onda (L) que representa a distância entre duas cristas ou dois vales, que por sua vez são a parte superior e inferior

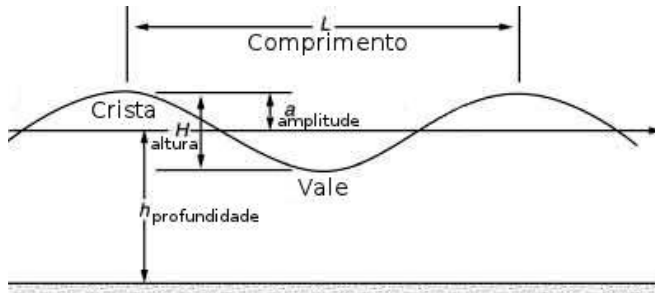


Figura 3 – Perfil de uma onda idealizada (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

da senoide, respectivamente.

A declividade de uma onda (H/L) é a razão entre H e L . Ainda como característica dinâmica, temos o período (T) que é o tempo que de movimento entre uma crista e outra e a frequência (f), correspondente a $1/T$. A partir destes parâmetros básicos, outras variáveis podem ser calculadas, a exemplo da celeridade, ou seja, a velocidade de propagação de uma onda (Eq. 2.1).

$$C = \frac{L}{T} \quad (2.1)$$

A propagação de uma onda, na realidade, sobre uma batimetria de fundo irregular e ao largo de ilhas envolve muitos processos como empinamento, refração, dissipação de energia e difração. Até recentemente, apenas modelos com várias aproximações existiam para prever o comportamento da onda devido a esses processos (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

Sabe-se que as ondas reais são não-lineares, por isso a teoria linear foi desenvolvida baseada nas seguintes simplificações (STOKER, 1992):

- a. o fluido é homogêneo e incompressível (densidade ρ constante);
- b. a tensão superficial é desprezada;
- c. o efeito de *Coriolis* é desprezado;
- d. a pressão na superfície livre é uniforme e constante;
- e. o fluido é ideal ou não viscido;
- f. o fundo é horizontal, fixo e impermeável;
- g. a amplitude de onda é pequena.

A partir dessas hipóteses estabelece-se que k é o *número de onda* (Eq. 2.2), C é a *celeridade de onda*, onde g é a aceleração da gravidade (Eq. 2.3) e C_g é a *celeridade de grupo* (Eq. 2.4).

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (2.2)$$

$$C = \sqrt{\frac{g}{k} \cdot \tanh(kh)} \quad (2.3)$$

$$C_g = \frac{C}{2} \cdot \left(1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right) \quad (2.4)$$

Desta maneira o número de onda k em um determinado ponto se relaciona com a frequência angular σ e com a profundidade h através da *relação de dispersão*, dada pela Equação 2.5.

$$\sigma^2 = gk \cdot \tanh(kh) \quad (2.5)$$

Substituindo-se $\sigma = 2\pi/T$ e $k = 2\pi/L$, simplificamos relação de dispersão e determinamos a *velocidade de fase* c , resultando na Equação 2.6.

$$c = \sqrt{g \cdot \frac{L}{2 \cdot \pi}} \quad (2.6)$$

2.1.2 Processos físicos relevantes

Ao se propagarem para a costa, deixando a zona de geração, as ondas passam para águas intermediárias e águas rasas, começando a interagir com o fundo progressivamente e com maior intensidade.

Simplificando as equações envolvidas nos modelos lineares, uma representação assintótica desta interação com o fundo pode ser estabelecida para calcular se uma onda está em águas profundas (Eq. 2.7), intermediárias ou rasas (Eq. 2.8) (DEAN; DALRYMPLE, 2001).

$$\text{águas rasas se } h < \frac{L}{20} \quad (2.7)$$

$$\text{águas profundas se } h > \frac{L}{2} \quad (2.8)$$

As órbitas das partículas que, em águas profundas, eram circulares passam, abaixo da superfície, a ser elipsoidais, sendo o achatamento das órbitas cada vez maior à medida que a distância ao fundo diminui, Figura (4)).

Conforme a velocidade da onda começa a ser determinada pela profundidade da coluna de água, que vai diminuindo, o avanço da onda é mais lento. Para manter a energia constante, sendo a energia da onda função de sua altura, quando a velocidade de propagação da onda diminui, sua altura aumenta, fenômeno este chamado de empolamento (*shoaling*, embancamento ou ainda empinamento).

O empinamento é responsável pela variação na altura das ondas ao se propagarem em locais mais rasos (DEAN; DALRYMPLE, 1991). Para se quantificar o empinamento, deve-se assumir que o fundo tem inclinação suave para que o trem de ondas se adapte a mudança de profundidades sem que haja reflexão. A consideração de inclinação suave é observada na plataforma continental.

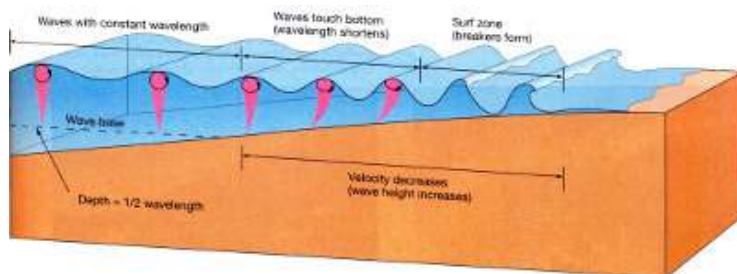


Figura 4 – Órbitas das partículas na propagação da onda em função da profundidade (THURMAN, 1997).

Considera-se que quando as ondas se propagam em águas rasas, o período permanece constante, porém a velocidade diminui, logo o comprimento de onda diminui também. Se uma série de ondas de cristas paralelas se aproxima de uma linha de costa reta num certo ângulo oblíquo acima da superfície plana do fundo do mar que fica gradativamente mais raso, as ondas mudam de direção a partir da onda que estiver mais perto da costa, que diminui a velocidade antes das que estão mais longe da costa (DEAN; DALRYMPLE, 1991).

Conclui-se então que em águas rasas, as ondas são influenciadas pelo fundo marinho de modo que a sua crista tende a se alinhar à linha de costa denominando assim o processo de *refração* (Fig. 5).

Quando ocorre mudança abrupta na altura de onda por encontrar uma feição ou estrutura que transpassa o limite batimétrico, como um quebra-mar por exemplo (Fig. 6) isto é consequência do chamado efeito de *difração*.

Em analogia ao fenômeno à luz, atrás de estruturas surgem "sombras" no campo de onda; as mudanças de altura de onda, então, levam à mu-

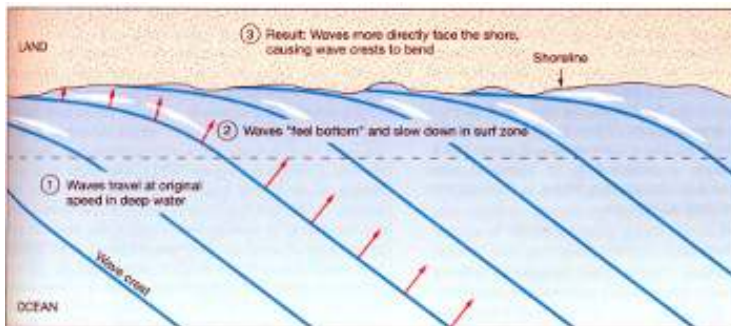


Figura 5 – Esquema da refração de ondas em uma praia, alinhamento das cristas com a linha de costa (THURMAN, 1997).

dança na direção das ondas, fazendo com que a onda volte para a zona de sombra.

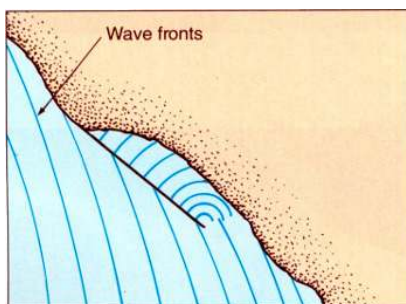


Figura 6 – Difração de ondas em um quebra-mar, cristas invadindo a zona de sombra (THURMAN, 1997).

As principais transformações das ondas em água rasa são devidas ao vento, a arrebentação, ao atrito com o fundo (na camada limite), percolação (para fundos porosos) e elasticidade (fundo móvel viscoso), muitas não contempladas pela teoria linear.

2.2 ESPECTRO DE ENERGIA DAS ONDAS

Ao observarmos as ondas marinhas, podemos notar que estas não se comportam como perfeitos sinusoides, se agitam de forma randômica, com-

postas por diferentes comprimentos de onda e períodos.

Desta maneira, para descrever a superfície do mar precisamos ter em conta o conceito de espectro de ondas oceânicas (STEWART, 2008). Esse espectro nos dá uma distribuição de energia de onda em diferentes frequências ou períodos.

O conceito de espectro neste caso é baseado na analogia feita às *Séries de Fourier*, através do qual a sobreposição linear de ondas sinusoidais com diferentes comprimentos e frequências, velocidades de fase e direção, pode representar a superfície complexa do mar; como mostra a Figura 7.

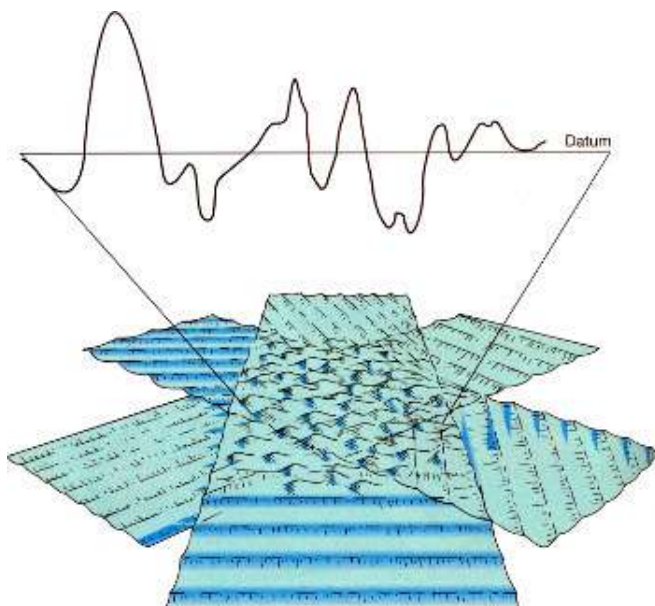
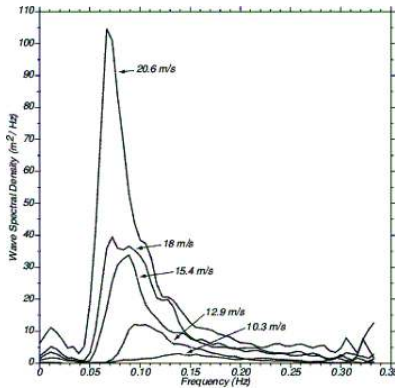


Figura 7 – Esquema da composição da superfície complexa do oceano em analogia às séries de Fourier (THURMAN, 1997).

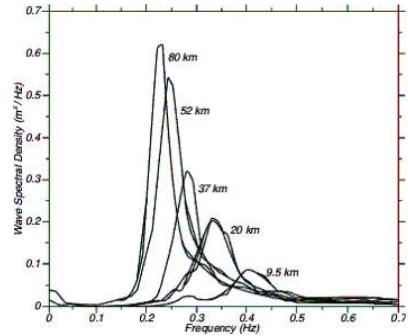
O espectro de onda é importante na classificação dos estados de mar de uma região. Duas formas idealizadas para um espectro de ondas são importantes: a distribuição espectral de *Pierson – Moskowitz* (Fig. 8a) e a de *Jonswap* (Fig. 8b).

A energia de uma onda é proporcional à variância do espectro, chamada de *espectro de energia* ou *espectro de altura de onda*. O valor de H_s é obtido através do cálculo da área da curva do espectro de onda.

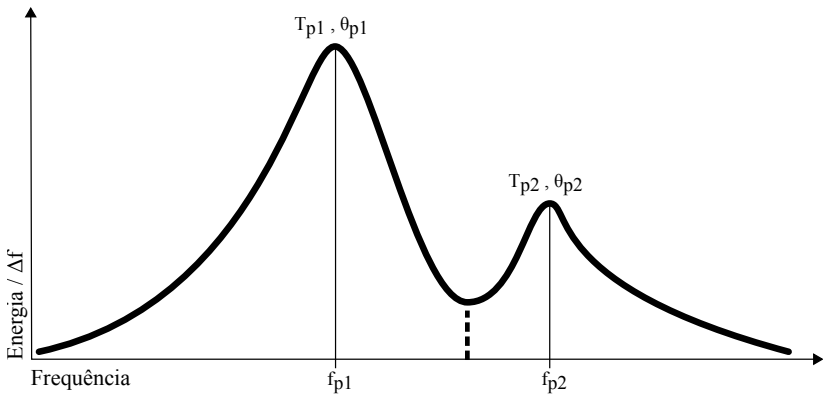
O empinamento, refração, difração, reflexão são processos conservativos, ou seja, alteram a forma da onda, porém não seu conteúdo energético



(a) Espectros de onda, Moskowitz (velocidade do vento).



(b) Espectro de onda, Jonswap (pista de onda).



(c) Esquema geral de um espectro bimodal.

Figura 8 – (a,b) Espectro de onda para mares completamente desenvolvidos baseados em diferentes parâmetros (STEWART, 2008); (c) Estados de mar coexistentes geram espectros multimodais.

(DEAN; DALRYMPLE, 2001). O estado da arte na modelagem computacional destes fenômenos é o modelo REF/DIF.

2.3 MODELO COMPUTACIONAL DE REFRAÇÃO E DIFRAÇÃO DE ONDA: REF/DIF

O modelo REF/DIF (Tab. 1) é a fase de resolução do modelo parabólico de refração-difração na propagação de ondas oceânicas de superfície. Devido à existência de modelos consequentes a este, como o REF/DIF-S (espectral), usaremos a nomenclatura *REF/DIF1* como referência ao REF/DIF monocromático.

Originalmente desenvolvido por Jim Kirby e Tony Dalrymple, em 1982 como um modelo de onda monocromática, atualmente modela os efeitos da refração, difração, presença de correntes, dispersão por amplitude, dissipação de energia por atrito de fundo e quebra. pos

O REF/DIF1 demanda pouca memória computacional, comparativamente a outros modelos, a exemplo dos que se baseiam na aproximação elíptica; isso possibilita a sua aplicação em grandes áreas costeiras. Uma limitação dos fenômenos que descreve é não calcular a reflexão (KIRBY *et al.*, 2002), logo, em zonas onde a reflexão é importante, este não deve ser aplicado.

2.3.1 Características de cálculo

As equações do modelo são combinam refração e difração explicitamente, simulando assim ondas em batimetrias de fundo irregular; resolvidas através do Método das Diferenças Finitas (MDF), com discretização espacial do domínio feita com uma malha regular retangular (KIRBY *et al.*, 2002).

O REF/DIF1 utiliza a equação de *Berkhoff*, conhecida como *mild slope equation*, equação de declive suave. Ela é descrita em termos de $\eta(x, y)$ (sobreelevação da superfície), deslocamento horizontal do operador gradiente ∇_h dado pela Equação 2.9.

$$\nabla_h \cdot (CC_g \nabla_h \eta) + \sigma^2 \cdot \frac{C_g}{C} \eta = 0 \quad (2.9)$$

A equação de declive suave permite ao modelo adotar o princípio da conservação de energia considerando que a onda se propaga sobre fundo de inclinação suave.

Os dados mínimos de entrada (*input*) com que o REF/DIF executa o cálculo, são:

batimetria: o relevo submerso (matriz FORTRAN77);

Tabela 1 – Resumo de identificação do modelo REF/DIF1

Característica técnica	Ref/Dif1
Dimensões espaciais	1D
Extensão espacial	Escala regional
Grande área	<i>Engineering Coastal and Research</i>
Plataformas suportadas	Unix, Linux, Windows®
Outras plataformas	Ref/Dif(v2.5) para DOS®
Linguagem de programação	Fortran77
Código otimizado	<i>Single Processor</i>
Início do desenvolvimento	1982
Desenvolvimento ativo?	Sim
Disponibilização do modelo	Código-fonte (<i>source</i>)
Disponibilização do código-fonte	Repositório na internet ^a

^a <http://chinacat.coastal.udel.edu/programs/refdif/refdif.html>, sob a licença GNU General Public License, Version 2.

malha MDF: número de pontos da malha (x, y) e espaçamento (dx, dy);

onda: período (T_p), direção (θ_p), amplitude ($H_s/2$).

Desta forma, propagando a onda em cada ponto da malha, são dados de saída (*output*):

H_s: a altura significativa no ponto;

θ : direção de propagação no ponto;

A: amplitude complexa no ponto;

η : sobrelevação da superfície no ponto.

Para a aplicação do modelo, deve-se garantir (BARLETTA, 2006):

- a. fundo é de inclinação suave (uso da *mild slope equation*);
- b. ângulo máximo de 45 da direção de propagação da onda com a da propagação principal (aumento da acurácia);
- c. mínimo de 5 pontos de malha por comprimento de onda (KIRBY *et al.*, 2002);

2.3.2 Limitações do modelo

Uma das limitações do modelo parabólico REF/DIF1 é que este é baseado na teoria de expansão da onda de Stokes, cuja validade da solução pode ser aferida pelo número de *Ursell*. Por isso a escolha da relação de dispersão a utilizar no modelo depende dos valores esperados para o parâmetro de *Ursell* no problema de modelagem.

Toda onda refletida é desprezada, por isso não deve ser utilizado em zonas que a reflexão seja importante. Segundo [Barletta \(2006\)](#), esta limitação é satisfeita no caso de costas com praias de areia, aonde se pode admitir que praticamente toda a energia vinda do oceano é dissipada na zona de arrebentação (não ocorrendo, portanto, reflexão).

Estas propriedades do modelo o tornam propício para a modelagem de onda em águas rasas, como é o caso da plataforma adjacente à Ilha de Santa Catarina. Contudo o REF/DIF1 simula ondas regulares (monocromática), tendo uma direção principal de propagação, apenas a difração de ondas na direção transversal à esta é representada.

Resultados mais acurados podem ser obtidos com o REF/DIF-S (espectral), que efetua a sobreposição linear dos resultados de REF/DIF1, correspondentes às várias componentes monocromáticas; compondo a propagação de uma onda irregular.

2.4 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A ilha de Santa Catarina (Fig. 9a) é parte do município de Florianópolis e situa-se no oceano Atlântico, no litoral sul do Brasil, no centro do litoral do Estado de Santa Catarina, entre as longitudes 48 Oeste e latitudes 27 Sul. Tem cerca de 54 km de comprimento (norte – sul) por no máximo 18 km de largura (Leste – Oeste), ao Norte, totalizando uma área de 424,4 km.

A abordagem do presente trabalho se aterá à caracterização dos aspectos morfodinâmicos da Ilha de Santa Catarina, relevantes na contextualização da zona costeira da região na concretização dos resultados.

A **zona costeira** é um sistema que se encontra em equilíbrio dinâmico, resultante da interferência de inúmeros fatores como: alternância entre as regressões e transgressões marinhas e a deformação das margens dos continentes.

Os principais elementos geomorfológicos da plataforma submarina (Fig. 9c) relativa à costa da Ilha de Santa Catarina estão representadas em cartas náuticas (*Carta 1902*), são elas: *Ilhas* do Arvoredo, de Anhatomirim, de Ratonas Grandes, de Guarazese Cardos, do Coral e *Pontas* do Rapa na Ilha

de Santa Catarina, de Ganchos no continente, dos Naufragados, do Cedro (DHN, 2006).

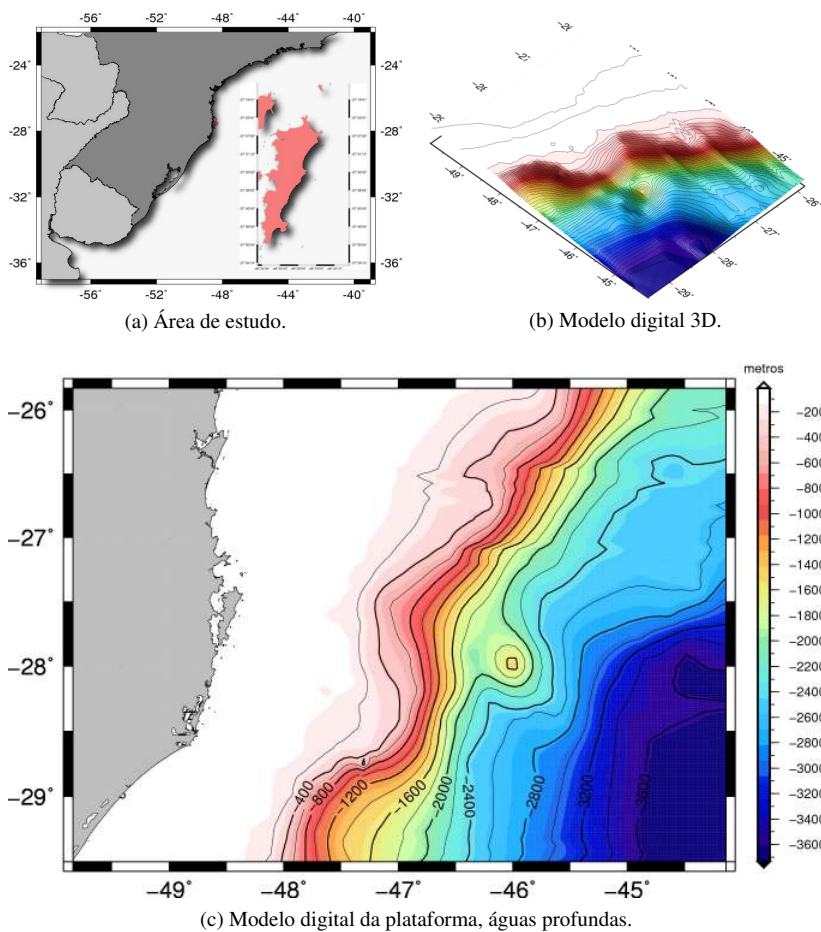


Figura 9 – Localização espacial da Ilha de Santa Catarina e seu relevo submerso adjacente. Coordenadas geodésicas em graus decimais (WGS84).

2.5 REGIME DE ONDAS

O termo **regime de onda** refere-se a uma descrição estatística das condições de onda, ou seja, da predominância de ventos de geração ou ondas em determinadas direções atingindo com alguma sazonalidade áreas específicas. Ondas com T_p , θ_p , H_s similares podem ser reincidentes em um mesmo domínio espacial, caracterizando assim um sistema de ondas.

2.5.1 Regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina

As condições de onda ao sul do Brasil foram objeto de estudo nos anos de 2003 (ARAÚJO *et al.*, 2003) e 2008 (FRANCO; FILHO, 2008).

Ambos estudos analisaram um conjunto de dados originais através da técnica de *cluster analysis*, com parâmetros de onda (T_p , θ_p , H_s) calculados a partir de registros horários da bóia *Waverider Datawell*.

2.5.2 Caracterização dos estados de mar

O espectro direcional de energia de onda proporciona uma descrição completa do estado de mar, pois caracteriza como a energia das ondas se distribui no domínio da frequência em uma dada direção; útil no cálculo das transformações sofridas pelo campo de ondas ao se propagar em água rasa.

São parâmetros de caracterização do estado de mar:

H_s **Altura significativa de onda** calculada através da energia total contida no espectro (m_o) de onda, é um bom estimador para boa parte de todas as ondas presentes no campo de ondas ($H_s = 4 \times \sqrt{m_o}$).

T_p **Período de pico** corresponde à frequência com a maior densidade de energia presente no espectro de frequência unidimensional.

θ_p **Direção média predominante** é a direção média associada a um determinado **período de pico**.

2.5.3 Espectro de energia multimodal

A técnica de *cluster analysis* utilizada por Araújo *et al.* e Franco & Filho, foi uma nova abordagem na identificação de grupos com características similares (Fig. 10b) no campo de ondas principais.

Com a distribuição bivariada sazonal: θ_p versus T_p e versus H_s e ainda T_p versus H_s ; os autores discriminaram valores de T_p e θ_p correspondentes ao pico de maior frequência do espectro, não considerando as regiões de baixa frequência (espectros bi/trimodais).

Mares bimodais (Fig. 8c) são representados principalmente pela superposição do mar de vento estável, com um dos sistemas de ondulação ou a coocorrência de duas ondulações próximas, com a fase da onda relacionada à passagem de uma frente fria (FRANCO; FILHO, 2008).

O uso do conteúdo energético do pacote de ondas e o espalhamento direcional como parâmetros para a *cluster analysis* simplificou a definição dos sistemas de ondas. Cada grupo englobou um diferente subespaço do plano (θ_p , T_p com valores médios) e foi interpretado como o representante de um "sistema de onda" particular (Fig. 10a).

Ondas de curto comprimento são, normalmente, geradas pelo vento e podem ser vagas (*sea*) ou ondulações (*swell*). A vagas são as ondas formadas por ventos locais e as ondulações se referem a ondas geradas em campos de vento longínquos.

A forma como vagas e ondulações se propagam em direção a costa interfere no estado de mar (descrição da agitação da superfície marinha).

2.5.4 Sistemas de onda

Esta análise possibilitou a identificação de cinco diferentes sistemas de onda (Tab. 2) e demonstrou como estes sistemas se combinam sob a forma de um espectro multimodal.

Tabela 2 – Características dos cinco sistemas diferentes identificados pela *cluster analysis* (Modificado de Araújo et al. (2003)).

Sistema	Tipo	T_p (segundos)	θ_p (origem)	Detalhe
A	Sea	8	SE ^a	bem desenvolvido ^b
B	Swell	14	SE	longínquo
C	Swell	11	E	local
D	Sea	4 – 5	NNE ^c	–
E	Sea	5 – 7	S ^d	bem desenvolvido

^a gerado pelo anti-ciclone do Atlântico-Sul

^b estado de mar próximo ao equilíbrio, quando o vento transmitiu boa parte de sua energia à superfície oceânica, incrementando H_s e L

^c gerado antes da passagem de sistemas frontais

^d gerado depois da passagem de sistemas frontais

Pode-se constatar então que a agitação marítima ao largo de Santa Catarina apresenta padrões mais complexos durante o Verão e o Outono, com uma mais precisa dominância de um o outro sistema de onda no Inverno e ainda mais na Primavera (FRANCO; FILHO, 2008).

Segundo Araújo *et al.*, estas características de onda refletem o sistema de ventos do Atlântico-Sul, que é altamente influenciado pela existência de um sistema semipermanente de alta pressão centrado sobre o oceano. A porção Oeste está associada ao giro anticiclônico que origina ventos persistentes do Nordeste ao longo da costa sul do Brasil.

2.6 ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO ÀS ONDAS

Ondas intensas erodem e deslocam materiais na zona costeira, favorecendo espécies resistentes à abrasão das ondas, e caso contrário, criando um ambiente de depósito pra espécies mais frágeis. Sabendo disto, podemos relacionar e estudar a relação com as espécies litorâneas.

Um índice de exposição às ondas é, basicamente, uma escala que expressa a intensidade das ondas que atingem uma determinada região.

Existem várias maneiras de estimar este índice, sendo uma das mais conhecidas a implementada por Thomas em 1985; que propôs um índice baseado na batimetria da zona costeira, na energia de geração do vento e na topografia da costa.

Para exemplificar as limitações do cálculo clássico de índices de exposição à ondas, iremos abordar brevemente a metodologia de Thomas (1985). Esta calcula as possíveis pistas de onda de cada ponto de interesse, através de dados de direção, intensidade e frequência de ventos. A formulação básica deste índice é dada na Equação 2.10.

$$EI = \sum \log W \left[1 + \frac{\log F}{(CS + 0,1 \cdot DS)} \right] \quad (2.10)$$

Onde EI é o índice de exposição às ondas:

W : é a energia do vento (% de tempo que sopra/100)·(velocidade do vento₂);

F : é a pista de vento em milhas náuticas (máximo 100 M);

CS : é a distância em M de água com profundidade < 6m adjacente à costa;

DS : é a distância em M de água com profundidade < 6m somente na pista de onda;

S : é a fração decimal da declividade média da costa (%), se multiplicado a EI, gera um índice EI_2 .

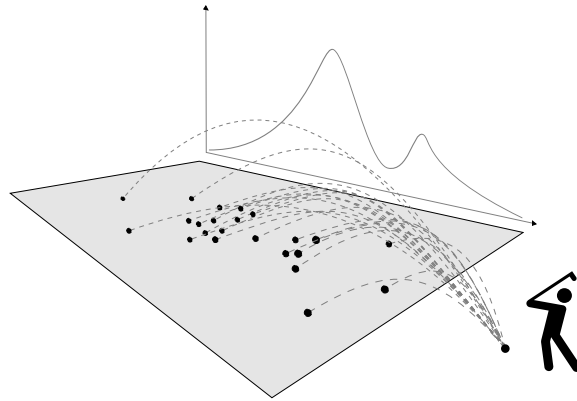
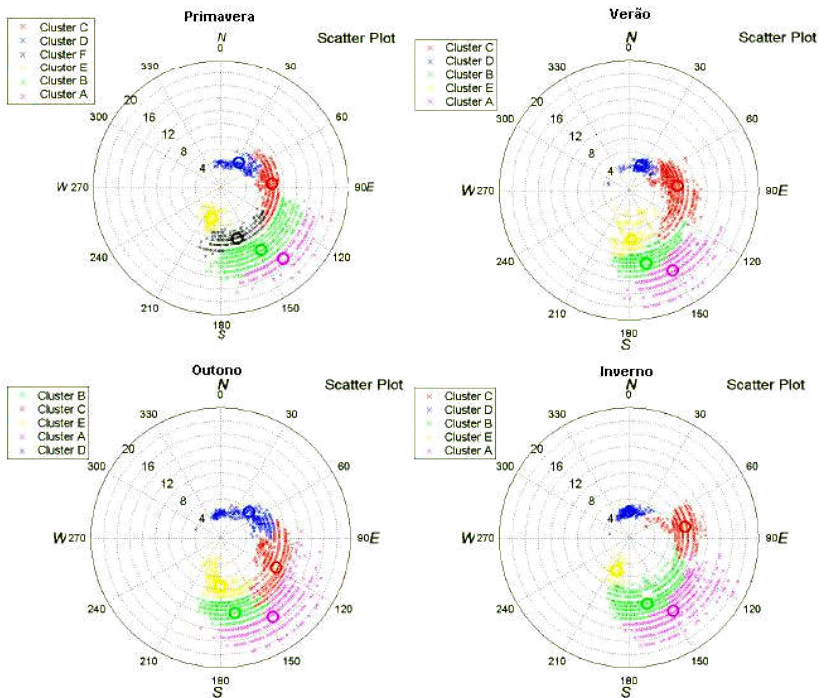
Os modelos mais comuns de cálculo do índice de exposição seguem basicamente a metodologia de Thomas (1985) e tem como etapas:

1. aquisição de dados de vento;
2. estimar altura significativa de onda e período de pico;
3. estimar do comprimento das pistas de onda;
4. estimar a energia das ondas pela teoria linear.

Nota-se que são métodos baseados na probabilidade da geração de onda devido à ocorrência de um vento gerador atuando tempo suficiente numa direção em que haja superfície disponível para que este transmita energia para o fluido por atrito.

Isto faz com que estes métodos sejam limitados na resolução espaço - temporal, pois os índices são baseados na exposição média da pista de onda e médias anuais do vento, focando na exposição e no vento e desconsiderando outros fatores.

Na região da Ilha de Santa Catarina as pistas de onda são maiores que 100M, e esta é atingida por ondulações não geradas por ventos locais. Desta forma, a natureza do presente trabalho se difere da metodologia empregada no cálculo do índice de Thomas (1985), pois é baseada em dados de ondas medidas em águas profundas, propagadas para águas rasas, características ao regime de onda da região.

(a) Analogia à *clustering*.

(b) Sistemas de onda A, B, C, D, E.

Figura 10 – (a) tacadas na mesma região do campo caracterizam um jogador; (b) *Cluster analysis* mostrando os 5 sistemas de onda A, B, C, D e E do litoral Sul (ARAÚJO *et al.*, 2003).

3 METODOLOGIA

A metodologia do presente trabalho (Fig. 11) é fundamentada na utilização do modelo parabólico REF/DIF1 para modelar a propagação de ondas oceânicas de superfície em águas rasas.

As ondas modeladas são características de cada sistema de ondas que atinge a Ilha de Santa Catarina. O tratamento dos dados de entrada e saída do REF/DIF1 foi feito com **rotinas computacionais** (*shell – script*), em sistema operacional *GNU/Linux*.

Foram utilizados exclusivamente **softwares livres**, como o GMT (*Generic Mapping Tools*) para interpolação da malha batimétrica, discretização das grades de cálculo e confecção dos mapas; e *GAWK* para manipulação do fluxo de dados e automação das rotinas.

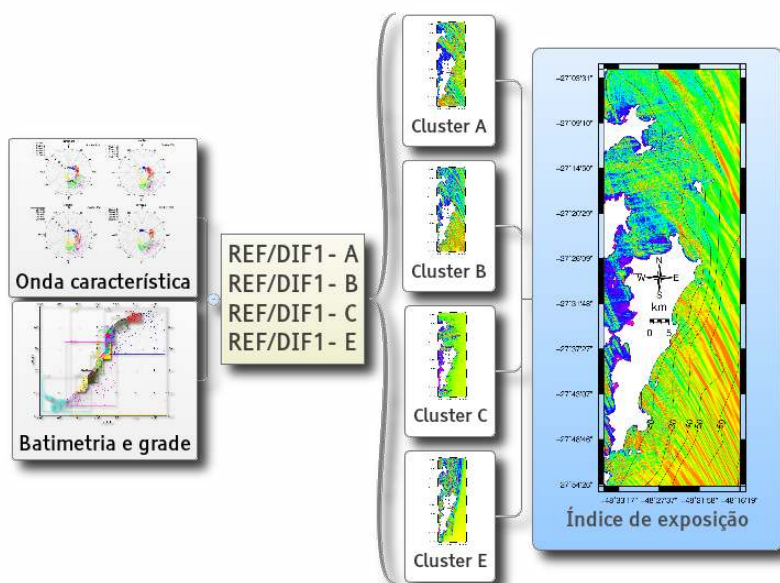


Figura 11 – Organograma da metodologia aplicada.

Como resultados da modelagem, obtemos então para cada ponto da malha de cada sistema de onda, o valor da **altura significativa de onda**, podendo ainda calcular o fluxo de energia para cada ponto da malha.

Calculamos então o índice de exposição às ondas, através de uma ro-

tina computacional que sobrepoë os cenários em uma malha única, podendo ser tanto de **altura significativa de onda** anual quanto de *fluxo de energia* anual da zona costeira da Ilha de Santa Catarina.

Cada elemento da metodologia será abordado de forma detalhada nos sub-tópicos posteriores.

3.1 TRATAMENTO DOS DADOS BATIMÉTRICOS

Batimetria é a medição da profundidade dos corpos d'água em geral (SILVA *et al.*, 2009). Quando se pretende modelar fenômenos costeiros, o elemento mais importante são os dados da topografia de fundo da zona costeira a ser modelada.

Os dados utilizados como batimetria no presente trabalho foram disponibilizados pelo Laboratório de Hidráulica Marítima (*LaHiMAR*), do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFSC.

Estes dados de batimetria, em arquivo de formato texto *ascii*, foram resultados da compilação de 16 cartas náuticas (Fig. 12), compreendendo uma área entre os seguintes extremos: longitude *O* 59° e latitude *S* 37°; longitude *O* 39° e latitude *S* 22°; desde o Rio de Janeiro ao Arroio Chuí (SILVA *et al.*, 2009).

O presente trabalho refere as coordenadas geográficas como LON (longitude) e LAT (latitude) Relativas e em graus decimais; todas no sistema de coordenadas WGS84, para ambos os *Datums* horizontal e vertical.

Primeiramente foram selecionados os pontos compreendidos entre as longitudes -49.34 e -46.94 e as latitudes -29.56 e -26.46. Posteriormente foi criada uma máscara colocando zeros a cada 10 arcos de segundo na zona correspondente ao interior da linha de costa da região.

Foram também adicionados os pontos de resolução 1 : 250.000 da linha de costa (*World Vector Shoreline* (SOLURI; WOODSON, 1990)) disponibilizada pela *National Geospatial-Intelligence Agency* (NGA) americana.

3.1.1 Escolha da área de modelagem

Foram determinadas três áreas com as seguintes características necessárias para a modelagem:

Área de controle: (Fig. 15) selecionada para testar previamente cada passo da metodologia. Corresponde às ilhas do Arvoredo (LON-48.39/-48.30, LAT-27.32/-27.24);

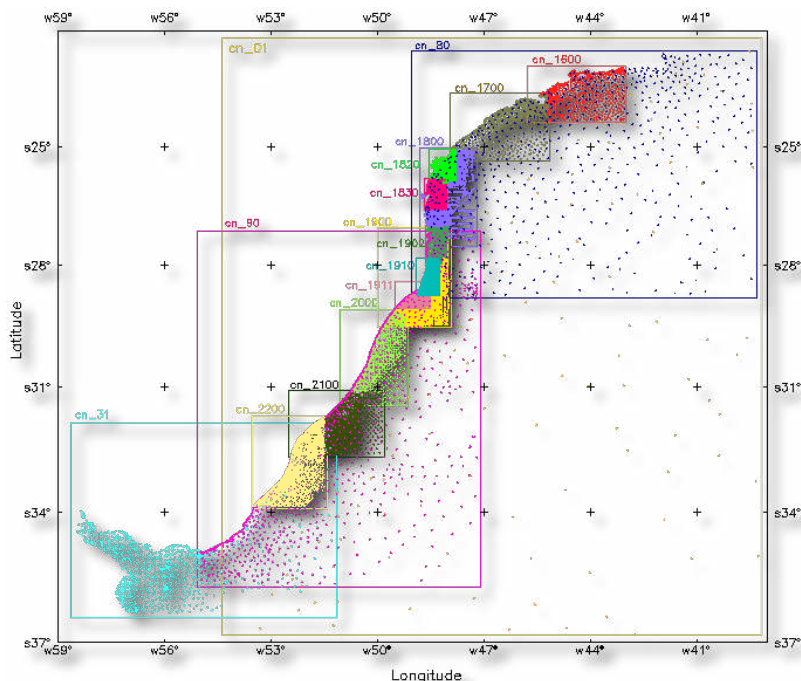


Figura 12 – Mosaico de pontos das cartas náuticas disponíveis no banco de batimetrias do LaHiMar.

Área de interesse região costeira da Ilha de Santa Catarina onde foi calculado o índice. Correspondente praticamente à Carta Náutica 1902 (LON-48.59/-48.27, LAT-27.91/-27.04) da [DHN](#);

Área de cálculo região necessária (Fig. 14b) para a propagação das ondas dos sistemas de onda modelados com maior acurácia (LON-49.34/-46.94, LAT-29.56/-26.46).

A área para cálculo é a região onde se enquadram cinco grades propostas por [Romeu \(2007\)](#) para o uso mais acurado do REF/DIF1, onde cada uma corresponde a uma faixa de direções de entrada de sistemas de onda característicos do largo da Ilha de Santa Catarina (Fig. 14a).

No presente trabalho tanto as grades, e por consequência a área de cálculo, foram expandidas. Tal decisão foi tomada para incluir as ilhas da região do Arvoredo no mapa de índice de exposição às ondas (Fig. 14b); no entanto a grandeza do ângulo de rotação de cada grade foi mantida (Tab. 3).

3.1.2 Amostragem da batimetria para as grades computacionais

As grades computacionais para a modelagem de ondas em água rasa necessárias para o presente trabalho (Fig. 14b) baseiam-se no trabalho de Romeu (2007), que propôs uma série de malhas (Fig. 14a) que contemplam as possíveis direções de chegada do trem de ondas que atinge a Ilha de Santa Catarina.

A acurácia dos resultados do modelo REF/DIF1 pode ser maior, quando rotacionamos a grade computacional de maneira que a direção de propagação da onda seja o eixo "X" da grade (BARLETTA, 2006). Desta maneira, foi necessária a criação de um algoritmo que calculasse um polígono rotacionado em relação aos Paralelos (Fig. 13).

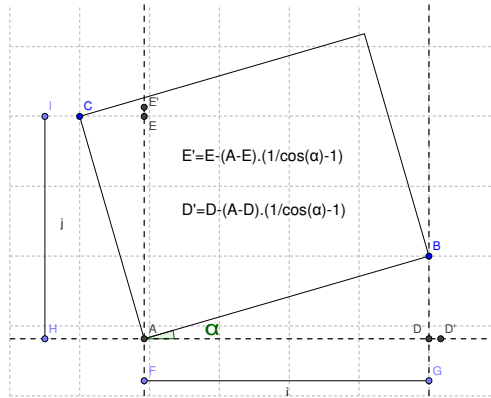


Figura 13 – Esquema da formulação do algoritmo de confecção dos polígonos.

A implementação do algoritmo de rotação contemplou a curvatura da Terra; as coordenadas de cada polígono foram elencadas na Tabela (3). Iniciou-se então a amostragem dos pontos x, y, z batimétricos internos aos polígonos, que por sua vez deram origem também às malhas de entrada para o REF/DIF1.

3.2 PREPARAÇÃO PARA O INPUT DO REF/DIF1

Devido a características técnicas do REF/DIF1, as grades precisaram ainda ser reorientadas e algumas espelhadas para que a direção de propagação da onda no modelo fosse obedecida (KIRBY *et al.*, 2002). Logo, os valores

Tabela 3 – Características do polígono calculado de cada grade.

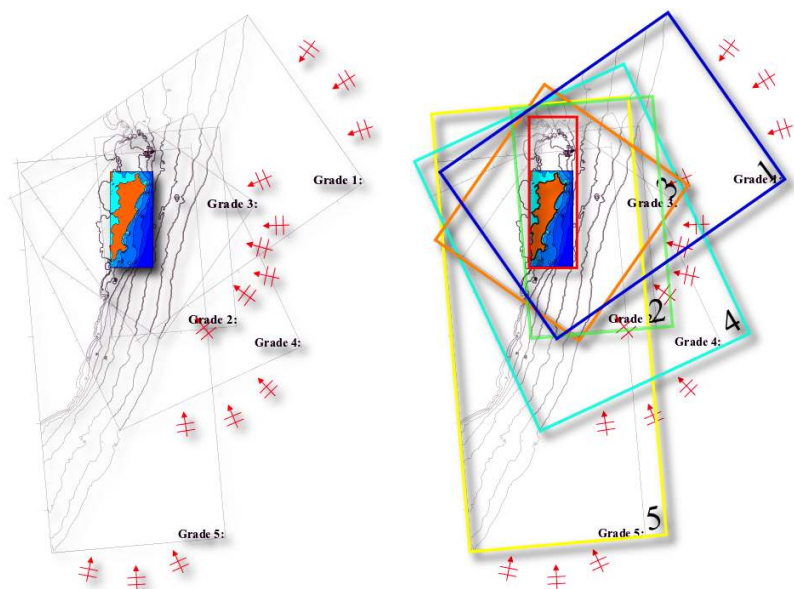
Polígono	Ângulo de rotação	Vértices (LON/LAT)
Grade1	(eixo)	-48.409 / -28.324
	33 graus	-46.948 / -27.488
	anti-horário	-47.643 / -26.522
		-49.112 / -27.360
Grade2	(eixo)	-48.581 / -28.318
	5 graus	-47.663 / -28.247
	anti-horário	-47.792 / -26.926
		-48.711 / -26.997
Grade3	(eixo)	-48.265 / -28.333
	55 graus	-47.563 / -27.451
	anti-horário	-48.493 / -26.861
		-49.206 / -27.747
Grade4	(eixo)	-48.516 / -28.849
	25 graus	-47.173 / -28.300
	anti-horário	-47.980 / -26.747
		-49.329 / -27.297
Grade5	(eixo)	-48.969 / -29.538
	5	-47.704 / -29.442
	anti-horário	-47.950 / -26.928
		-49.216 / -27.023

de longitude e latitude a partir deste passo são esféricos, mas não georreferenciados, o *rumo* do Norte é especificado na bússola das figuras, apenas os vértices com a palavra *eixo* na Tabela (3) possuem valores reais de LON/LAT.

Devido à zona de cálculo se localizar na região de transição da Zona UTM 22J para a 23J, onde a aproximação da representação espacial é maior, utilizou-se coordenadas esféricas em detrimento à métrica, UTM.

Um fator importante na preparação do *input* é a faixa de profundidade suportada pelo modelo. Como sua formulação é propícia para propagação d onda em água rasa, todos os valores de batimetria mais profundos que 80 metros foram igualados a 80 após o processo de interpolação. Este valor justifica-se por ser a profundidade onde foram obtidos os registros horários da boia *Waverider Datawell* por Araújo *et al.* (2003).

Segundo (ROMEU, 2007), o ruído numérico dos resultados do REF/-



(a) Região das grades necessárias para modelagem da área colorida (ROMEY, 2007).

(b) Região de grades selecionada para para modelagem.

Figura 14 – Área para cálculo da propagação das ondas, onde estão contidos os polígonos da Tabela 3.

DIF1 pode ser diminuído através da aplicação do método de *ilha película*. Por esta razão os valores menos profundos que 0,1 metros foram igualados a 0,1 após o processo de interpolação, aplicando assim a técnica mencionada.

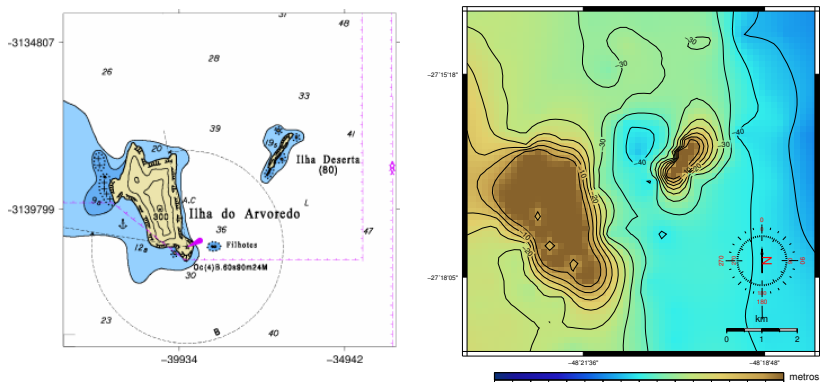
3.2.1 Interpolação dos pontos de batimetria

Para uma boa resolução de malha, foi necessário interpolar os pontos x, y, z contidos em cada polígono para os pontos da malha discretizada (dx, dy).

Na interpolação foi utilizada a técnica de *spline* regularizada com tensão, implementada no *software* GMT por Wessel & Bercovici (1998) e utilizada largamente em todo o mundo. A literatura indica um coeficiente de tensão de $T = 0,35$ para batimetrias para este tipo de interpolação (WESSEL; BERCOVICI, 1998).

Os pontos foram interpolados para uma malha de 1.8arcosdesegundo de espaçamento em todas as grades. As feições da ilha do Arvoredo foram comparadas com as da Carta Náutica 1902 (Fig. 15a) como forma de controle da interpolação (Fig. 15b).

As Figuras (16), (17), (18), (19), (20) mostram a batimetria interpolada à malha discretizada dos pontos x,y,z em cada polígono (Tab. 3), para águas rasas, até 80 metros de profundidade.



(a) Feições segundo a Carta 1902 (DHN, 2006).

(b) Feições da batimetria interpolada.

Figura 15 – Controle na interpolação da batimetria. Alta similaridade na batimétrica de 20 metros.

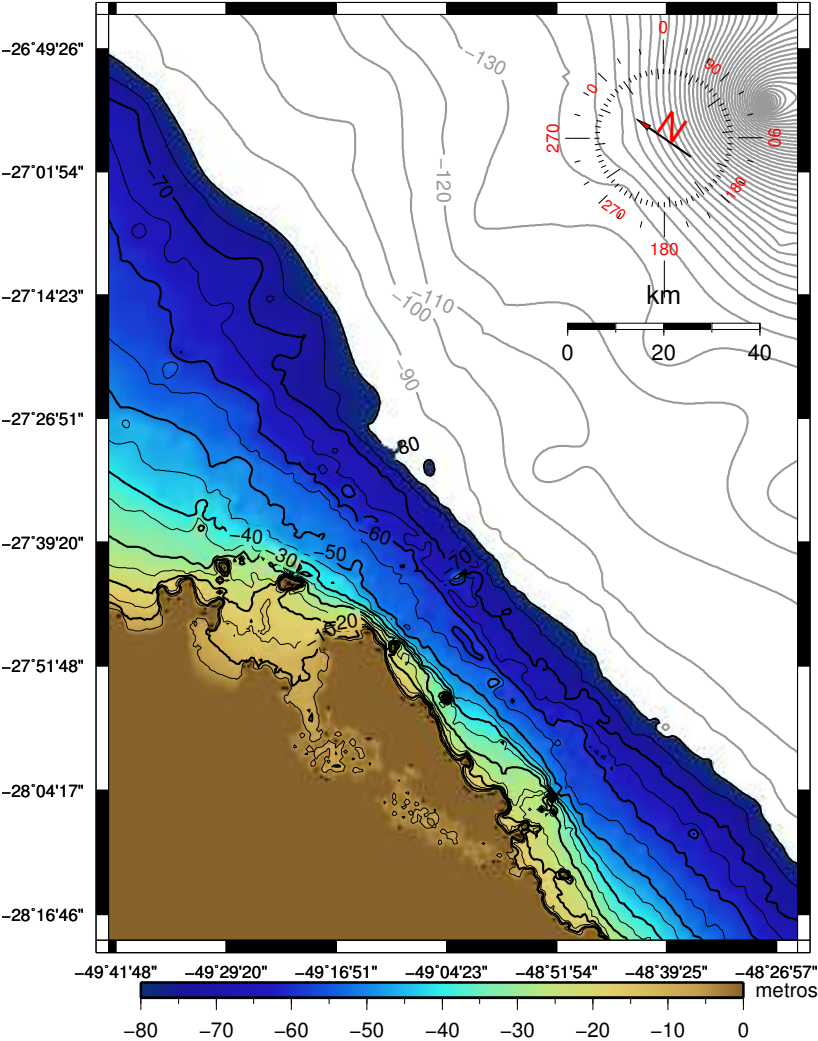


Figura 16 – Batimetria representativa à Grade1.

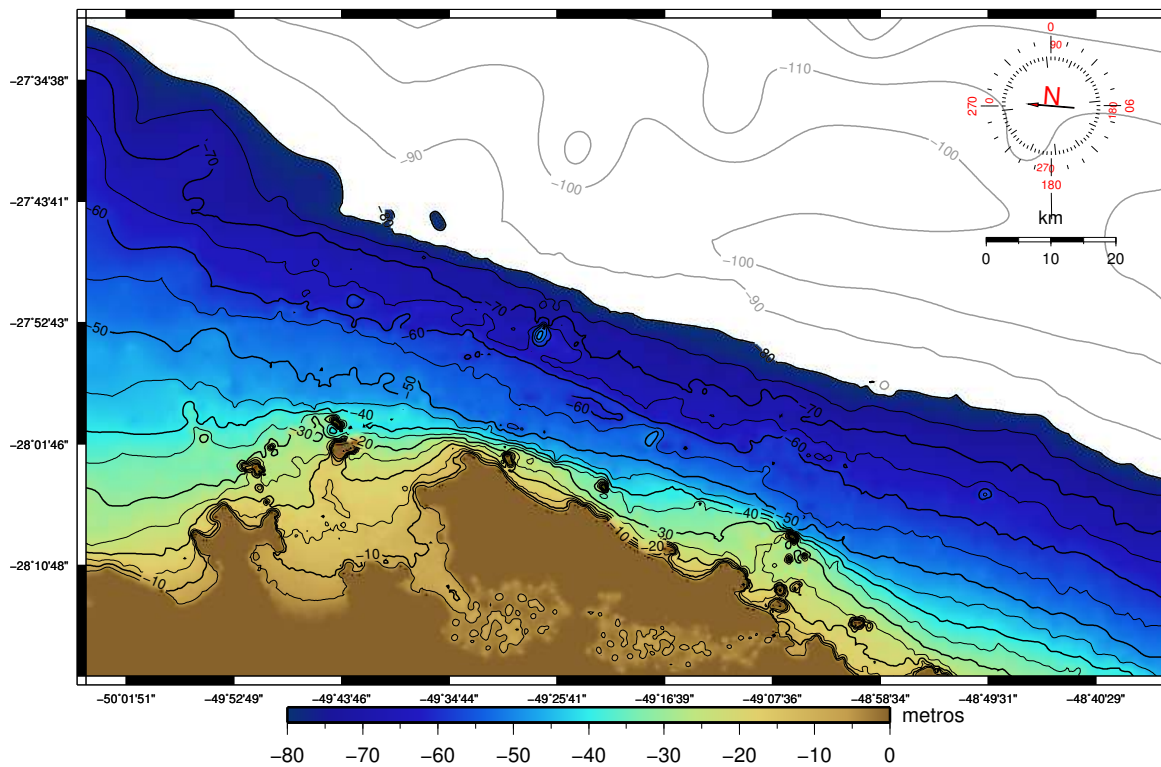


Figura 17 – Batimetria representativa à Grade2.

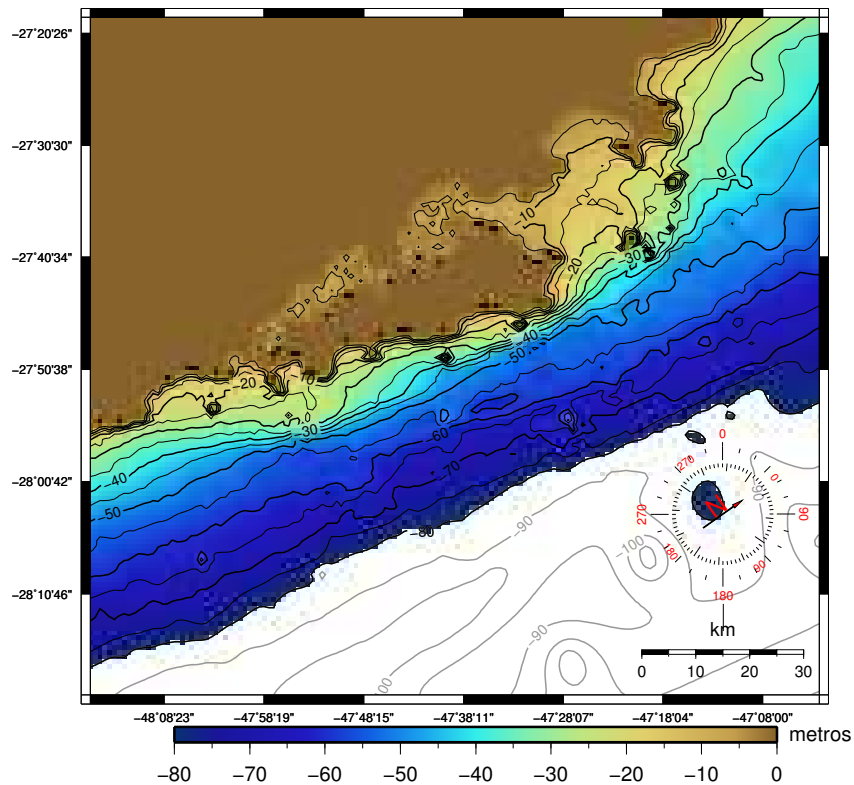


Figura 18 – Batimetria representativa à Grade3.

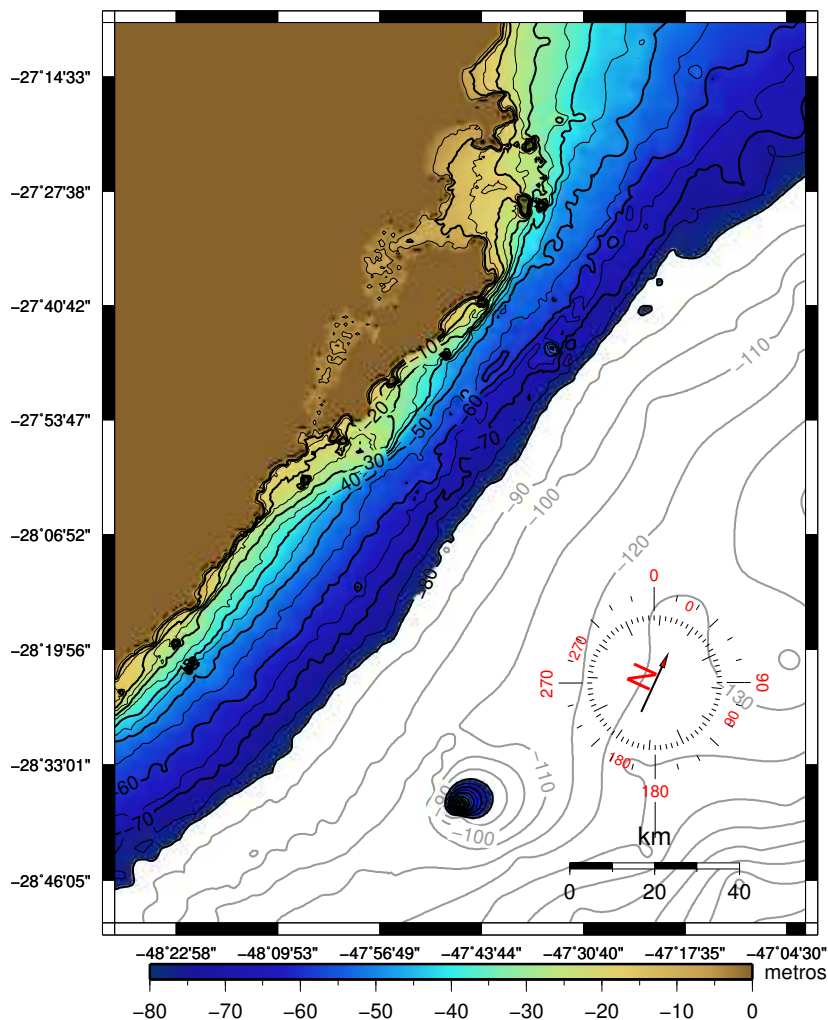


Figura 19 – Batimetria representativa à Grade4.

3.2.2 Estruturação das malhas batimétricas

O modelo REF/DIF1 tem seu código-fonte escrito em FORTRAN77, por isso os dados de entrada devem ser dispostos no *input* na forma de um

arquivo texto *ascii* matricial, chamado *refdat.dat*.

Para este fim foi criada uma **rotina computacional** que organizou os dados batimétricos de cada grade discretizada em matrizes de texto no format 20f10.4, com espaçamento de 50 metros ($\approx 1,8$ arcos de segundo ou 0,0005 graus decimais). Os resultados desta etapa foram compilados na Tabela (4).

Tabela 4 – Características das malhas discretizadas com $(dx,dy)=50m$.

Malha discretizada	β^a	Nós em x	Nós em y	Total de nós
Grade1	55°	2601	3113	8096913
Grade2	85°	3012	1635	4924620
Grade3	125°	2451	2026	4965726
Grade4	155°	2958	3420	10116360
Grade5	175°	2524	5045	12733580

^a orientação do eixo x (ROMEUEU, 2007).

3.2.3 Estruturação dos cenários

Utilizando os estados de mar já identificados (Subsec. 2.5.4), podemos elaborar cinco cenários de entrada do trem de ondas que atinge a Ilha de Santa Catarina.

As propriedades características da onda ($T_p(s)$, $\theta_p(^{\circ})$, $H_s(m)$) dos cinco sistemas de onda (ARAÚJO *et al.*, 2003)(Fig. 10b), A, B, C, D e E apresentados, foram enquadradas nas grades propostas por Romeu (2007), dando origem aos cenários a serem modelados (Tab. 5).

Vale ressaltar que o cenário *emD* não se enquadrou em nenhuma faixa limite de direção média levantada. Foram realizados então testes de modelagem para este cenário com a Grade1, porém os resultados não foram satisfatórios.

Haveria a necessidade de uma grade semelhante à Grade1, com um ângulo maior de rotação para modelar o cenário *emD*; por estas razões este foi descartado dos passos de modelagem, sendo incluído apenas na frequência de ocorrência dos outros cenários (Tab. 8).

Partindo do princípio que os índices que foram calculados neste trabalho são anuais, a diluição da contribuição sazonal do cenário *emD* nos outros modelados é aceitável.

Tabela 5 – Composição dos cenários através do enquadramento dos *clusters* com as grades.

Cenários ^a	Clusters ^b					
		A	B	C	D	E
	H_s (m)	1,25	1,00	1,00	1,25	1,50
	T_p (s)	14,2	11,4	8,5	4,7	6,4
Faixa de θ_p ^c	θ_p (°)	146	162	92	27	188
Grade1: 30 – 65		┘	┘	┘	emD	┘
Grade2: 65 – 105		┘	┘	emC	┘	┘
Grade3: 105 – 145		┘	┘	┘	┘	┘
Grade4: 145 – 175		emA	emB	┘	┘	┘
Grade5: 175 – 210		┘	┘	┘	┘	emE

^a Cenários "estados de mar": emA, emB, emC, emD, emE.

^b (ARAÚJO *et al.*, 2003)

^c (ROMEU, 2007)

3.2.4 Estruturação dos arquivos de configuração (*indat.dat*)

O modelo REF/DIF1 recebe os parâmetros de modelagem através de arquivos de texto que contêm as variáveis de configuração (Tab. 6), chamado *indat.dat*.

Foi aplicada **altura significativa de onda** unitária na fronteira, ou seja, a onda monocromática entra na fronteira de propagação com 1 metro de **altura significativa de onda**. Os parâmetros utilizados na execução do REF/DIF1 para cada cenário estão elencados na Tabela (7).

Configurados os arquivos, o REF/DIF1 foi executado, tendo como saída (*output*) de interesse o arquivo chamado *height.dat*, contendo a **altura significativa de onda** em cada nó da malha de cada cenário (Fig. (21b), (22b), (23b), (24b)).

Com o intuito de verificar a correta execução do modelo, o arquivo de saída chamado *depth.dat* de cada cenário foi processado nas Figuras (21a), (22a), (23a), (24a). Este arquivo contém os valores em tempo de execução da profundidade de cada nó das malhas.

Tabela 6 – Variáveis de configuração do REF/DIF1 (KIRBY *et al.*, 2002).

Variável	Definição: opções
MR	Número de pontos de grade no eixo x
NR	Número de pontos de grade no eixo y
IU	Sistema de medida: 1* (S.I.), 2 (Americano)
NTYPE	Tipo de não - linearidade: 0 (linear), 1* (composto), 2 (Modelo de Stokes)
ICUR	Dados de correntes: 0* (sem correntes), 1 (com correntes)
IBC	Condição de contorno na fronteira: 0 (fechada), 1* (aberta)
DXR	Distância entre os pontos em x
DYR	Distancia entre os pontos em y
DT	Profundidade de tolerância
ISPACE	Controle de subdivisões em x : 0* (automática), 1 (manual)
ND	Número de subdivisões em y
IFF	Dissipação na camada limite de fundo: 0* (não considera); 1 (turbulenta), 2 (porosa), 3 (laminar)
ISP	Sub gradeamento da parte monocromática
IINPUT	Valores iniciais de amplitude complexa: 1* (calcula), 2 (lê de <i>wave.dat</i>)
IOUTPUT	Valores finais de amplitude complexa: 1* (não escreve), 2 (escreve em <i>owave.dat</i>)
IWAVE	1* (componente discreta de onda)
NFREQS	Número de componentes de frequência
FREQS	Período de onda para cada componente de frequência
TIDE	Offset da maré para cada componente de frequência
NWAVS	Número de componentes de onda para cada frequência
AMP	Amplitude (altura significativa de onda/2) para cada componente de onda
DIR	Direção em graus decimais, relativa ao eixo x para cada componente de onda

* valor utilizado para todos os cenários do presente trabalho.

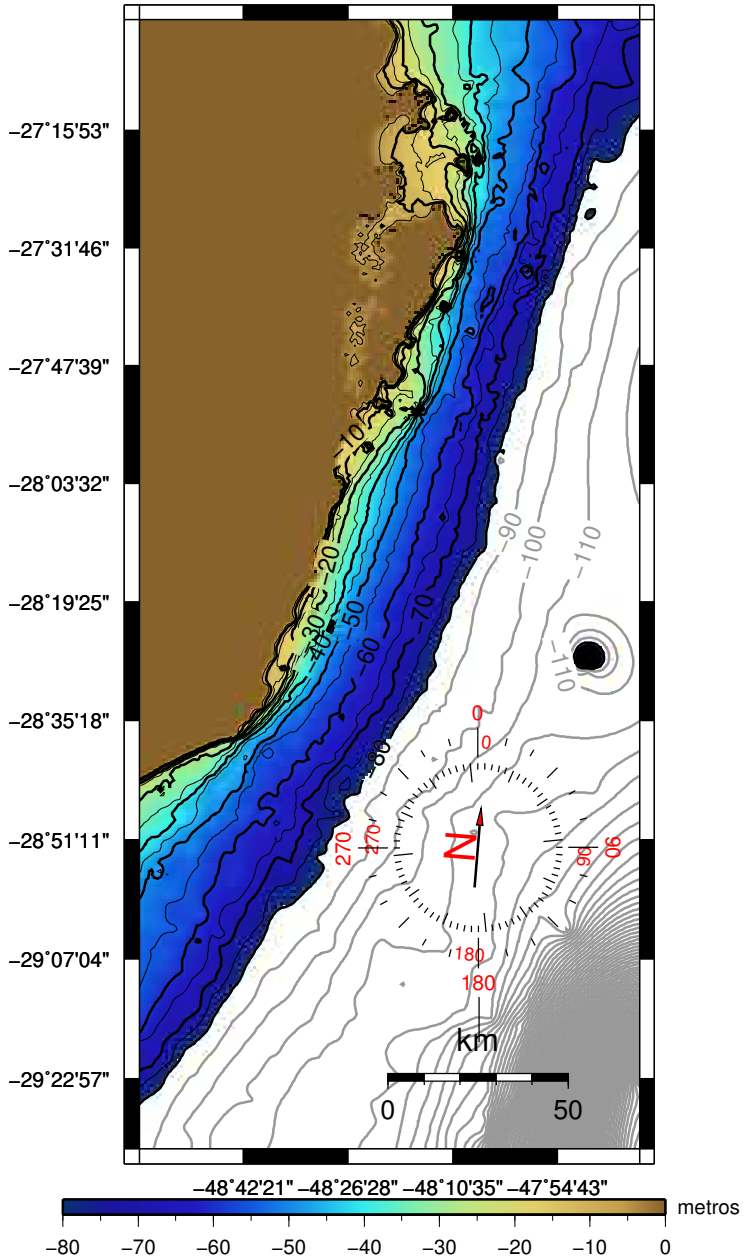


Figura 20 – Batimetria representativa à Grade5.

Tabela 7 – Parâmetros utilizados

Cenário	<i>indat.dat</i> ^a				
	MR	NR	FREQS (s)	AMP ^b (m)	DIR ^c (°)
emA	3420	2958	14,2	0.5	-9
emB	3420	2958	11,4	0.5	7
emC	1635	3012	8.5	0.5	7
emE	5045	2524	6.4	0.5	13

^a $(dx, dy) = 50$ e $dt = 10$.
^b para $H_{suntria} = 1$ na fronteira, $a = Hs/2$.
^c ângulo de incidência na grade: $\theta_p - \beta$.

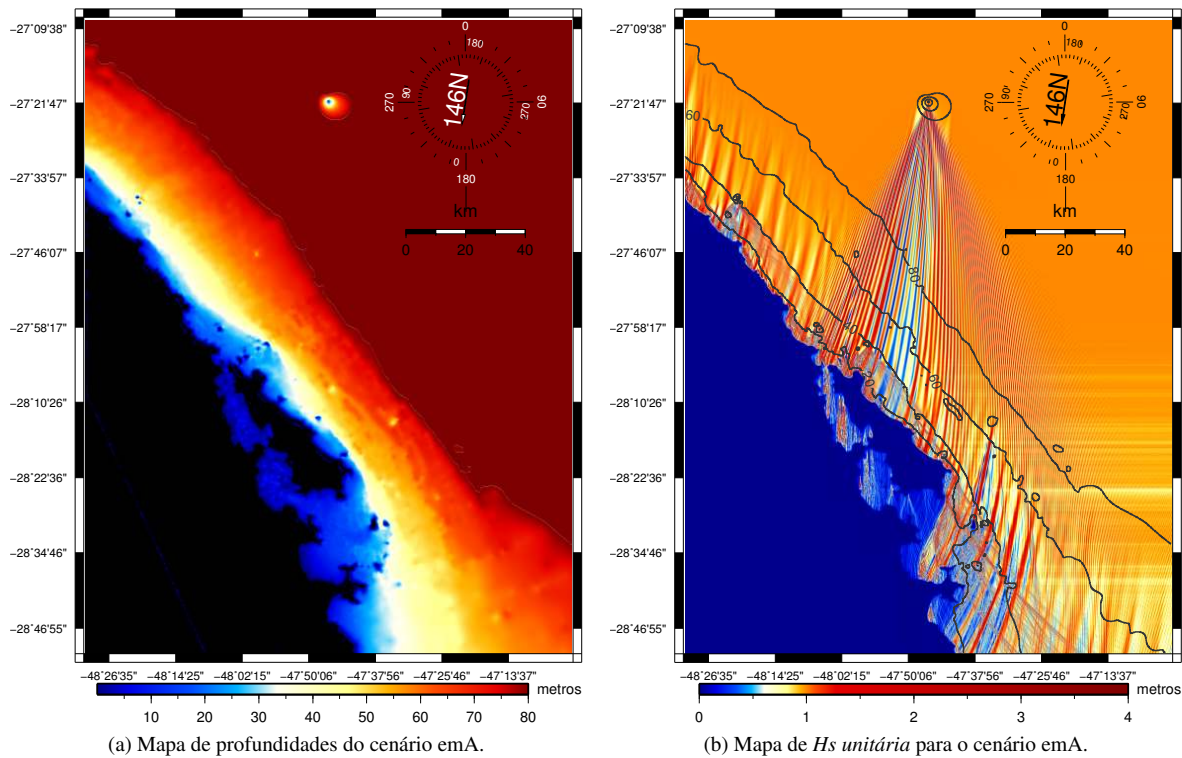


Figura 21 – Mapa de profundidades em tempo de execução e H_s unitária emA.

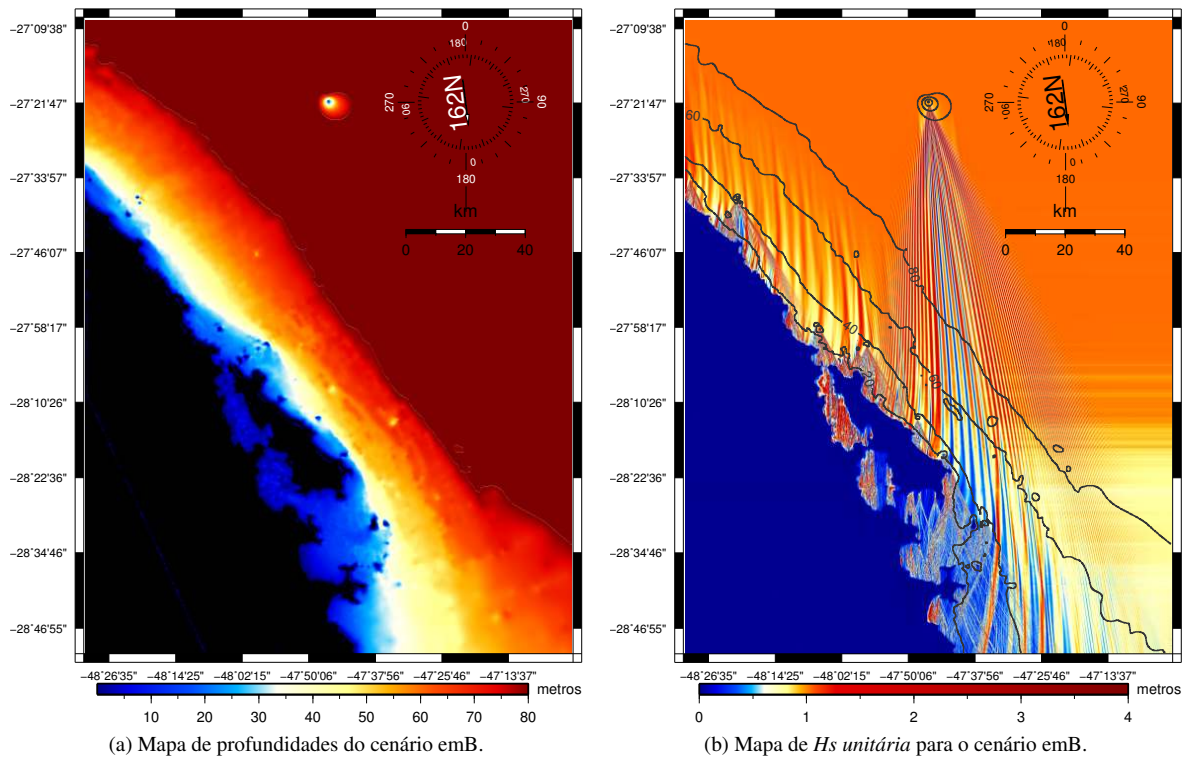


Figura 22 – Mapa de profundidades em tempo de execução e H_s unitária emB.

A altíssima semelhança entre os mapas de batimetria e os mapas de profundidade gerados com o *depth.dat*, constatou o correto carregamento da malha de relevo submerso no modelo. Iniciou-se então a etapa de pós-processamento.

3.3 PÓS-PROCESSAMENTO DO OUTPUT

A etapa de pós-processamento consiste em organizar os resultados do modelo explicitamente, na forma de tabelas ou mapas. Quando tratamos de modelagem ambiental há a necessidade de localizar estes resultados espacialmente no meio de estudo.

O primeiro passo desta fase foi o georreferenciamento das malhas de **altura significativa de onda**, devido ao REF/DIF1 não trabalhar com nós georreferenciados. Para esta finalidade foram construídas **rotinas computacionais** com o *software* **GMT**. Foi possível assim, o espelhamento de A, B, E e a rotação de todas as malhas, pelo *Método das Rotações Finitas* (MRF).

O produto desta etapa pode ser visualizado nas Figuras (25), (26), (27) e (28). Estas figuras estão georreferenciadas e apresentam a bússola indicando a direção de entrada de onda do sistema que foi modelado.

O georreferenciamento foi vital para o passo seguinte; o corte da área de interesse, para que os nós de todas as malhas se sobreponham adequadamente ao se calcular o índice de exposição às ondas.

A mesma região foi cortada de todas as grades (Fig. 29, 30, 31 e 32), resultando na área compreendida entre LON-48.59/-48.27 e LAT-27.91/-27.04. A malha georreferenciada resultante possui 640×1740 nós, espaçados em $0,0005^\circ$ (50 metros).

3.4 FORMULAÇÃO E CÁLCULO DO ÍNDICE DE EXPOSIÇÃO ÀS ONDAS

Dois tipos de índice foram formulados para representar a exposição às ondas da zona costeira da Ilha de Santa Catarina.

O primeiro é baseado na média das **alturas significativas de onda** anuais dos cenários calculados, ponderados segundo a contribuição sazonal (Tab. 8) de cada um. O segundo é o fluxo de energia por unidade de comprimento de crista de onda.

Os estados de mar não modelados foram redistribuídos (Tab. 9) na contribuição nos sistemas de onda calculados; partindo do princípio da ocorrência simultânea e alternância entre eles.

Tabela 8 – Contribuição Sazonal dos *Clusters* (%) (ARAÚJO *et al.*, 2003).

Contribuição Sazonal dos <i>Clusters</i> (%)					
Clusters	Primavera	Verão	Outono	Inverno	p_i^a
A	7,7	20,9	18,6	31,6	0,14
B	35,5	33,9	37,2	34,7	0,35
C	32,1	32,7	22,9	24,0	0,32
D ^b	7,5	5,4	13,1	7,4	0,06
E	4,1	7,1	8,2	2,3	0,06
F ^b	13,1	0,0	0,0	0,0	0,07
TOTAL	100	100	100	100	1,00

^a sem a redistribuição da contribuição.

^b não modelado.

^c não modelado, F é um sexto sistema identificado por Araújo *et al.* (2003) com contribuição frequente apenas na Primavera.

O peso (p_i) é resultado do somatório das contribuições de um mesmo sistema dividido pelo total das contribuições vezes cem. O peso redistribuído, de forma análoga, é o somatório da ponderação da contribuição em uma determinada estação (Tab. 9), dividido pelo total das contribuições vezes cem.

Tabela 9 – Contribuição Sazonal Redistribuída dos *Clusters* (%).

Contribuição Sazonal Redistribuída <i>Clusters</i> (%)					
Clusters	Primavera	Verão	Outono	Inverno	p_i^a
A	9,7	22,1	21,4	34,1	0,16
B	44,7	35,8	42,8	37,5	0,40
C	40,4	34,6	26,4	25,9	0,37
D ^b	–	–	–	–	–
E	5,2	7,5	9,4	2,5	0,06
F ^b	–	–	–	–	–
TOTAL	100	100	100	100	1,00

^a utilizado no cálculo.

^b redistribuído.

3.4.1 Índice H_s (média ponderada)

A partir dos valores de **altura significativa de onda** em cada ponto da malha na zona de interesse foi calculada a média anual ponderada, descrita pela Equação 3.1.

$$H_{s,anual} = \sqrt{H_{s,i}^2 \times p_i + \dots} \quad (3.1)$$

Onde $H_{s,anual}$ é dado em metros:

$H_{s,i}$: é a **altura significativa de onda** de maior probabilidade para o sistema de ondas i (metros);

p_i : é a probabilidade de ocorrência do sistema de ondas i .

Para os estados de mar A, B, C e E, temos:

$$H_{s,anual} = \sqrt{H_{s,A}^2 \times p_A + H_{s,B}^2 \times p_B + H_{s,C}^2 \times p_C + H_{s,E}^2 \times p_E} \quad (3.2)$$

Sendo p_i o total de horas nas quais foi registrado o sistema de ondas " i " no ano dividida pelo total de horas do ano, na Figura (33) foi calculado o campo do índice de exposição às ondas H_s . Este índice representa a altura significativa média anual da crista da onda em um dado ponto.

3.4.2 Índice ϕ (fluxo de energia)

Para cada sistema de onda calculou-se o fluxo de energia por unidade de comprimento da crista da onda a partir dos valores de **altura significativa de onda** em cada ponto da malha na zona de interesse. O fluxo anual de energia (ϕ) é dado pela Equação 3.3.

$$\phi_i = \frac{\rho g^2}{64\pi} \cdot H_{s,i}^2 \cdot T_i \rightarrow \phi_i = 0,5 \cdot H_{s,i}^2 \cdot T_i \quad (3.3)$$

Onde ϕ_i é dado em kW/m :

T_i : é o **período de pico** para o sistema de ondas i (segundos)

O fluxo anual de energia é dado então pela soma ponderada da energia de cada sistema de onda:

$$\phi_{anual} = \phi_i \times p_i + \dots \quad (3.4)$$

Onde ϕ_i é dado em kW/m :

ϕ_i : é o fluxo de energia para o sistema de ondas i (kW/m);

p_i : é a probabilidade de ocorrência do sistema de ondas i .

Sendo p_i o total de horas nas quais foi registrado o sistema de ondas " i " no ano dividida pelo total de horas do ano, na Figura (34) foi calculado o campo do índice de exposição às ondas ϕ .

3.5 RESULTADOS

As figuras da batimetria interpolada mostraram ser representativas ao relevo submerso na zona costeira, principalmente no que se trata da sobrelevação ao sul, que pode ser notada nas Figuras 19 e 20.

Esta sobrelevação mostrou ser de enorme influência na maneira de como as ondulações vindas de Sul Sudeste atingem a Ilha de Santa Catarina. As figuras de altura significativa unitária mostram isto, a sobrelevação hora cria uma zona de sombra na parte central da ilha, hora origina um espalhamento de altura significativa considerável.

Resultantes à modelagem da propagação de onda monocromática para cada cenário (Fig. 29, 30, 31, 32) foram gerados mapas que representam a altura significativa de onda média anual ao largo da Ilha de Santa Catarina referente a cada sistema de onda modelado.

Resultantes ao cálculo dos índices H_s (Fig. 33) e ϕ (Fig. 34) foram gerados mapas que mostram sua distribuição espacial ao largo da Ilha de Santa Catarina.

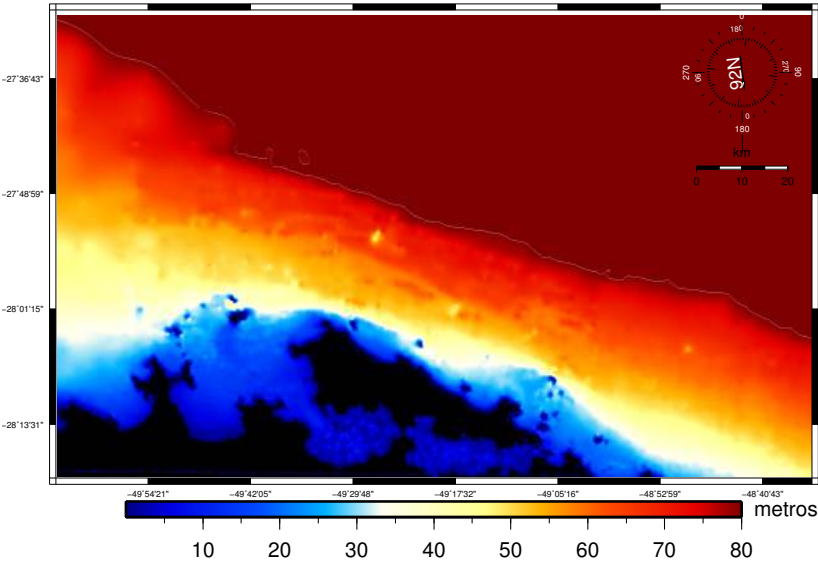
Como pode ser notado nas figuras dos índices H_s e ϕ , as ondulações de Sul são as mais energéticas e a de Leste caracteriza um mar local.

O índice baseado no fluxo de energia anual mostrou ser mais representativo, já que possui uma escala de valores mais ampla, variando de 0 a 500, enquanto o índice baseado na altura significativa anual apresenta valores entre 0 e 6.

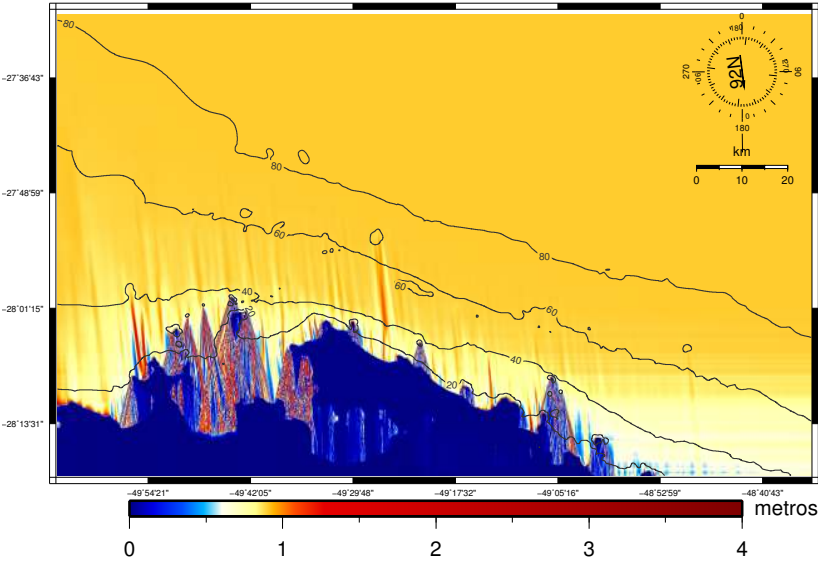
As Figuras 35a e 35b mostram histogramas de frequência relativa (logarítmica), onde as barras verticais tem a mesma cor da escala de cores dos mapas gerados para cada índice. Pode-se notar que existe pouca ocorrência de valores que caracterizam regiões de elevada exposição às ondas, os valores de maior ocorrência são de pequena grandeza.

Como resultado, também foram produzidos mapas que mostram o valor dos I.E (índice de exposição) nas profundidades de 10 (Fig. 36, 42), 20 (Fig. 37, 43), 30 (Fig. 38, 44), 40 (Fig. 39, 45), 50 (Fig. 40, 46) e 60 metros (Fig. 41, 47), assim como gráficos que mostram como o índice varia em relação à distância percorrida na nesta isóbata.

A numeração dos pontos nas Figuras de 10 (36, 42), 20 (Fig. 37, 43), 30 (Fig. 38, 44), 40 (Fig. 39, 45), 50 (Fig. 40, 46) e 60 metros (Fig. 41, 47); foi feita com base no número total de pontos na isóbata e em nenhuma localização espacial em especial. Por exemplo um ponto numerado como 1000 foi o milésimo ponto amostrado na isóbata. A escala de cores obedece as escalas dos índices supracitados.

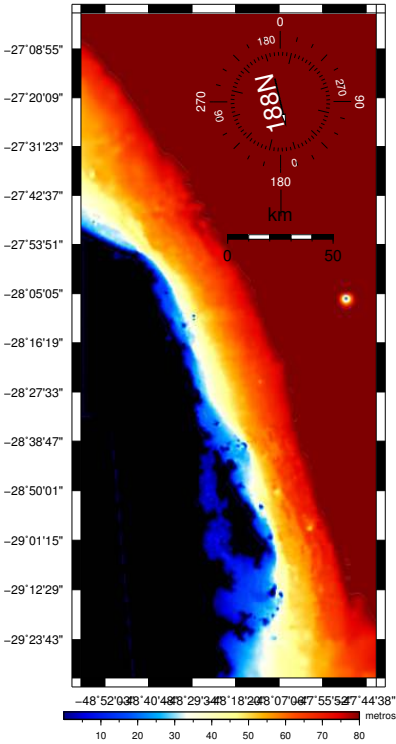


(a) Mapa de profundidades do cenário emC.

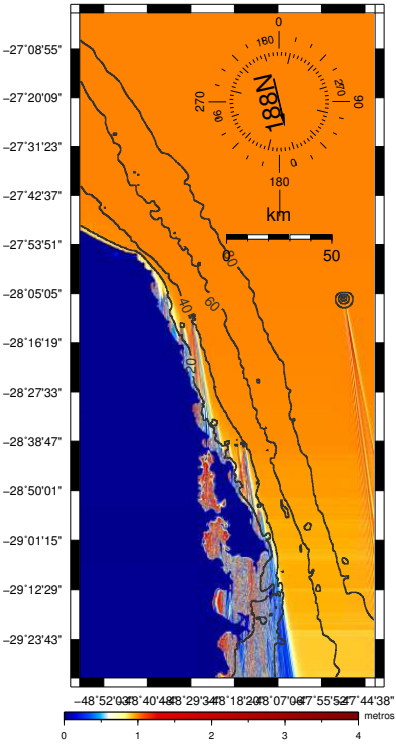


(b) Mapa de H_s unitária para o cenário emC.

Figura 23 – Mapa de profundidades em tempo de execução e H_s unitária emC.



(a) Mapa de profundidades do cenário emE.



(b) Mapa de H_s unitária para o cenário emE.

Figura 24 – Mapa de profundidades em tempo de execução e H_s unitária emE.

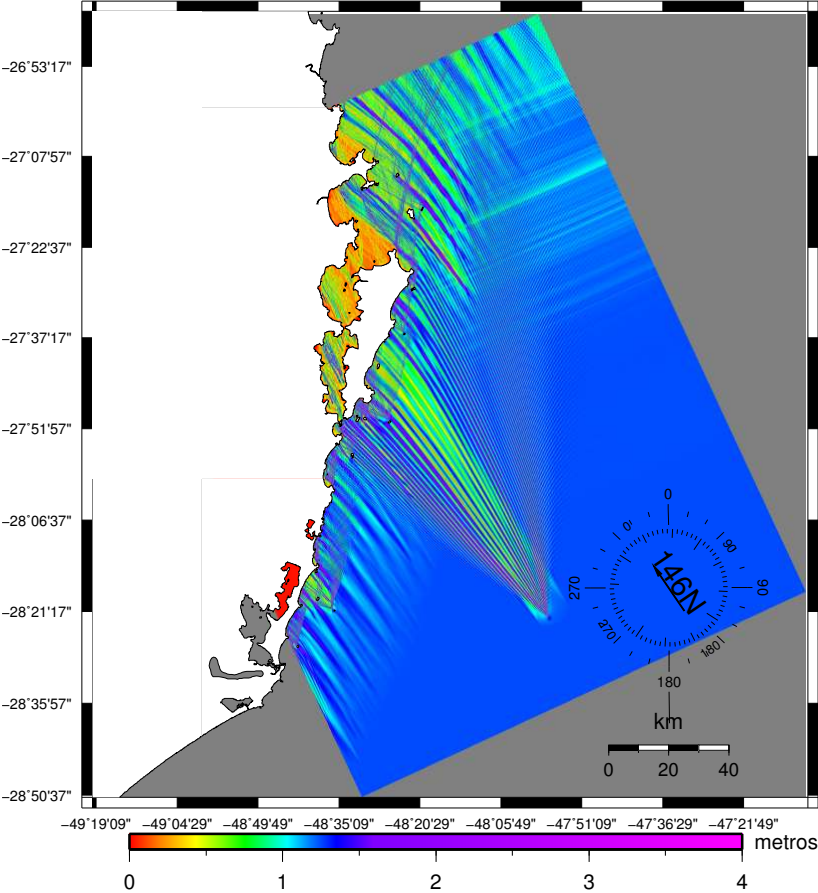


Figura 25 – Mapa de H_s , emA, onda monocromática propagada com 1,25 metros.

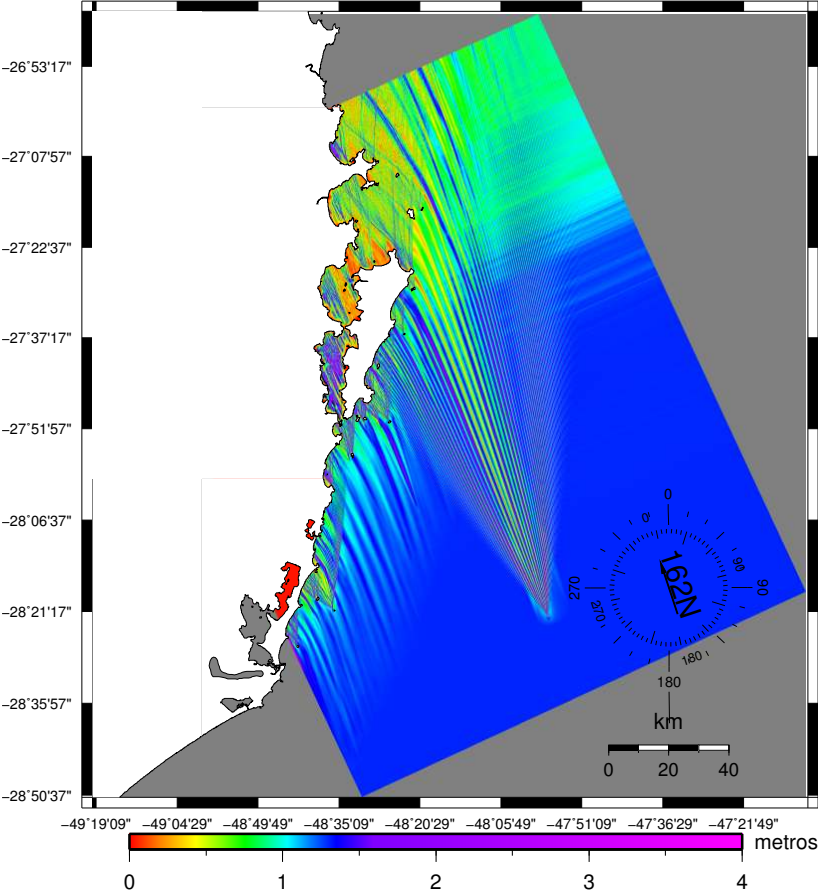


Figura 26 – Mapa de H_s , emB, onda monocromática propagada com 1,00 metro.

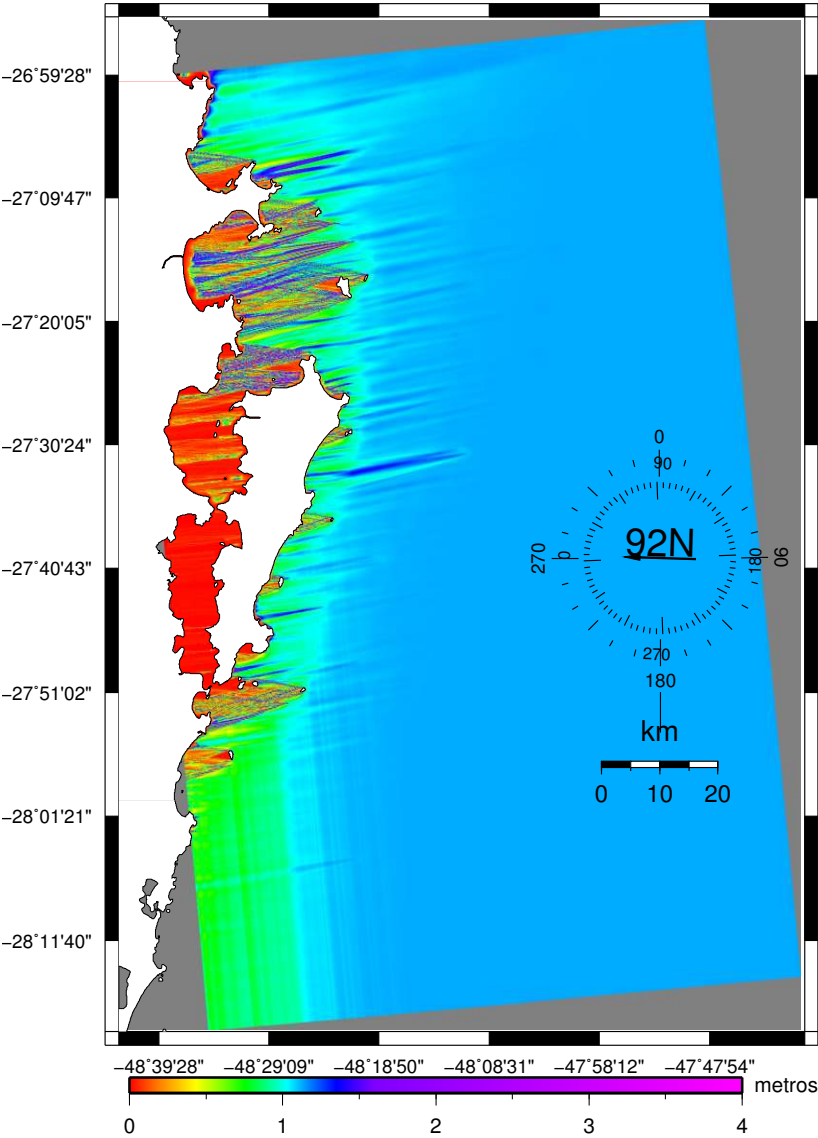


Figura 27 – Mapa de H_s , emC, onda monocromática propagada com 1,00 metro.

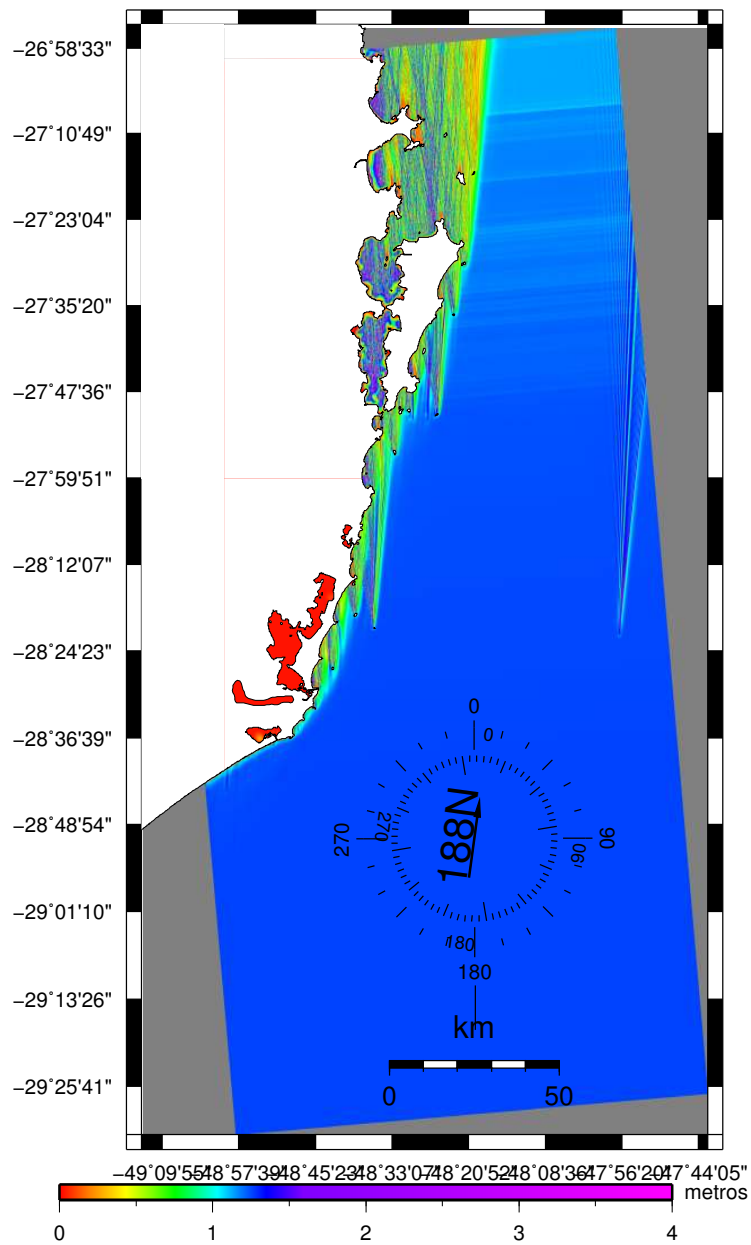


Figura 28 – Mapa de H_s , emE, onda monocromática propagada com 1,5 metros.

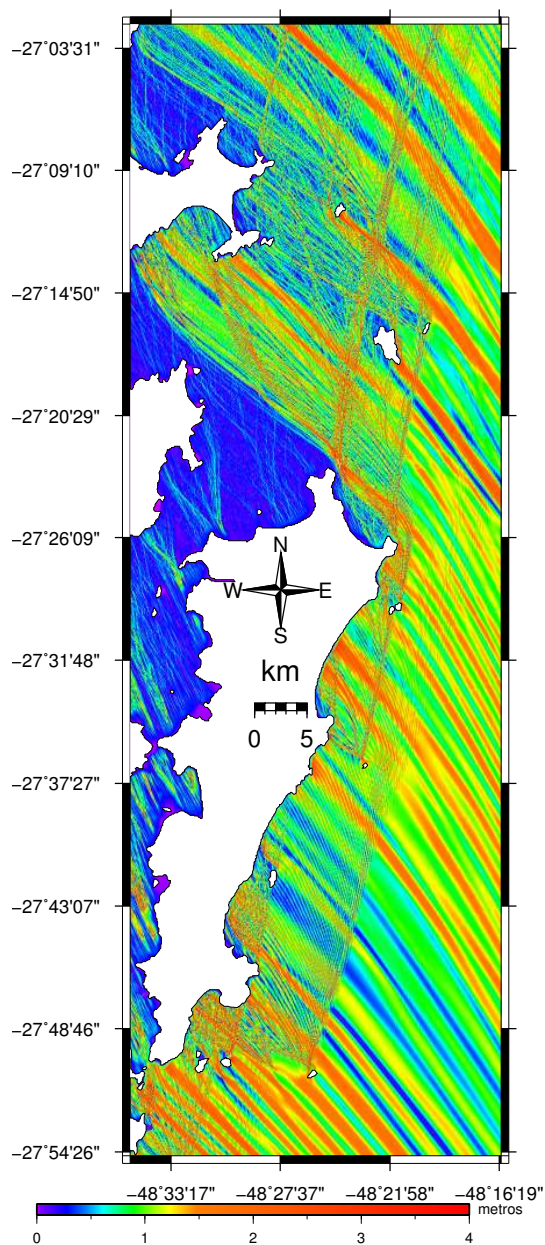


Figura 29 – Ilha de Santa Catarina, cenário emA, onda monocromática propagada com 1,25 metros.

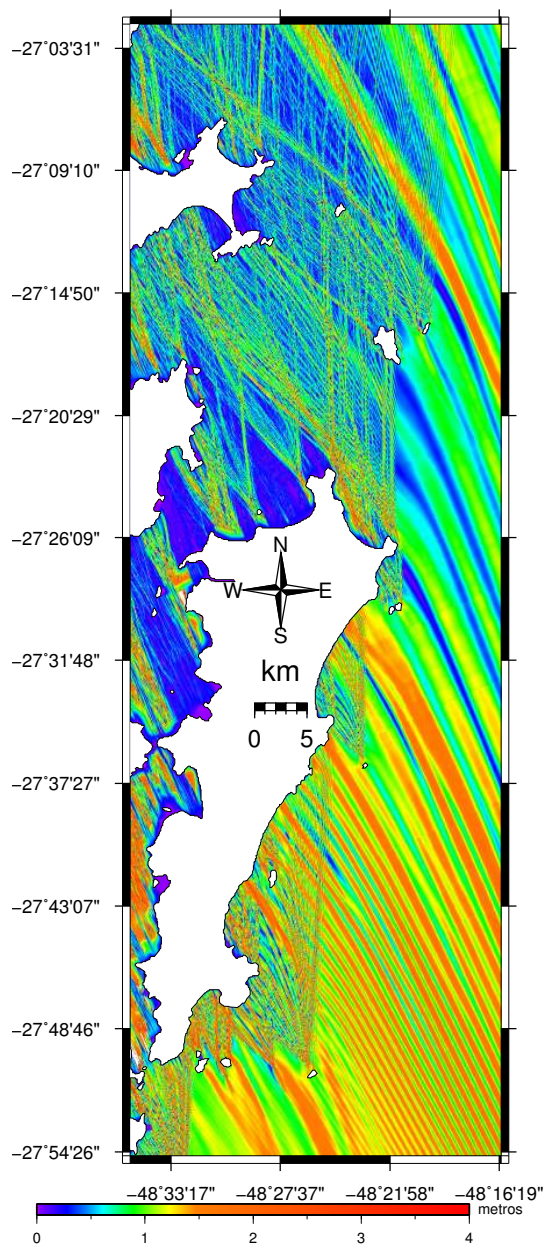


Figura 30 – Ilha de Santa Catarina, cenário emB, onda monocromática propagada com 1,00 metro.

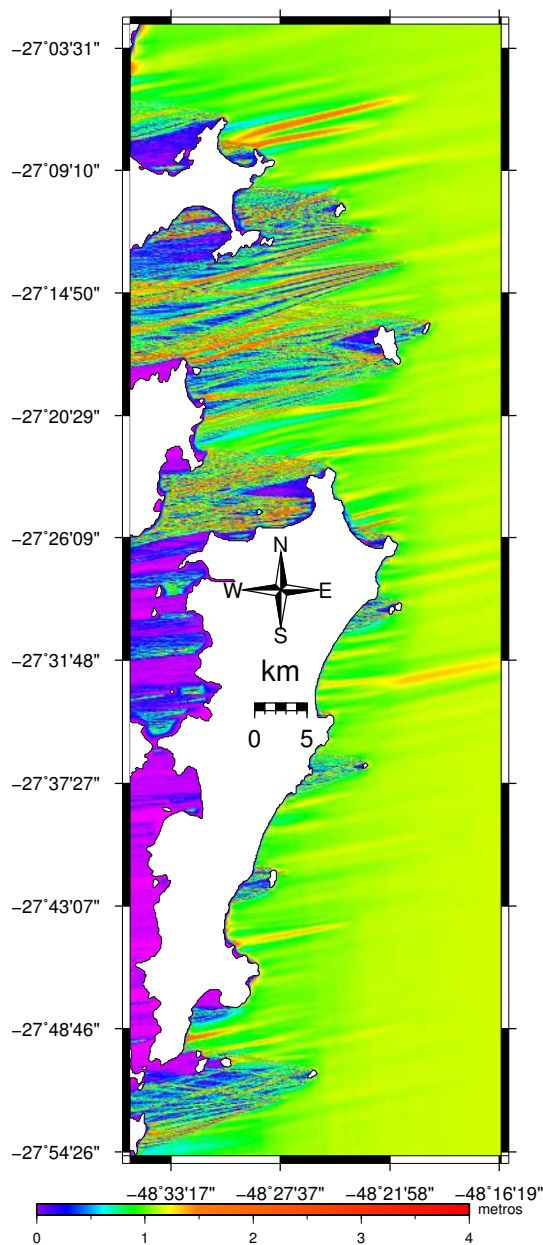


Figura 31 – Ilha de Santa Catarina, cenário emC, onda monocromática propagada com 1,00 metro.

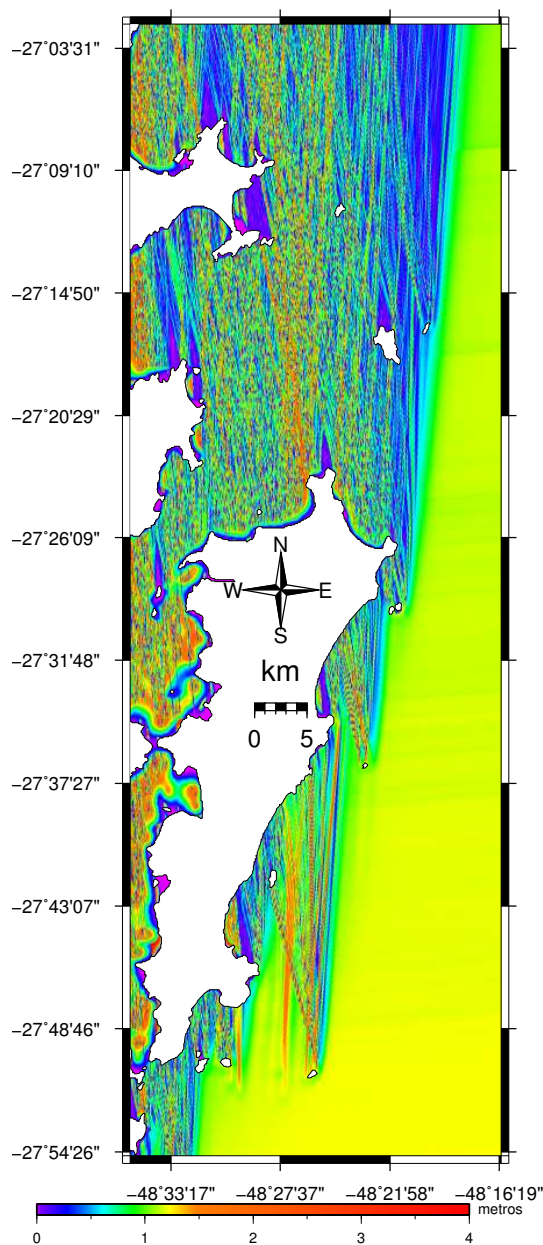


Figura 32 – Ilha de Santa Catarina, cenário emE, onda monocromática propagada com 1,5 metros.

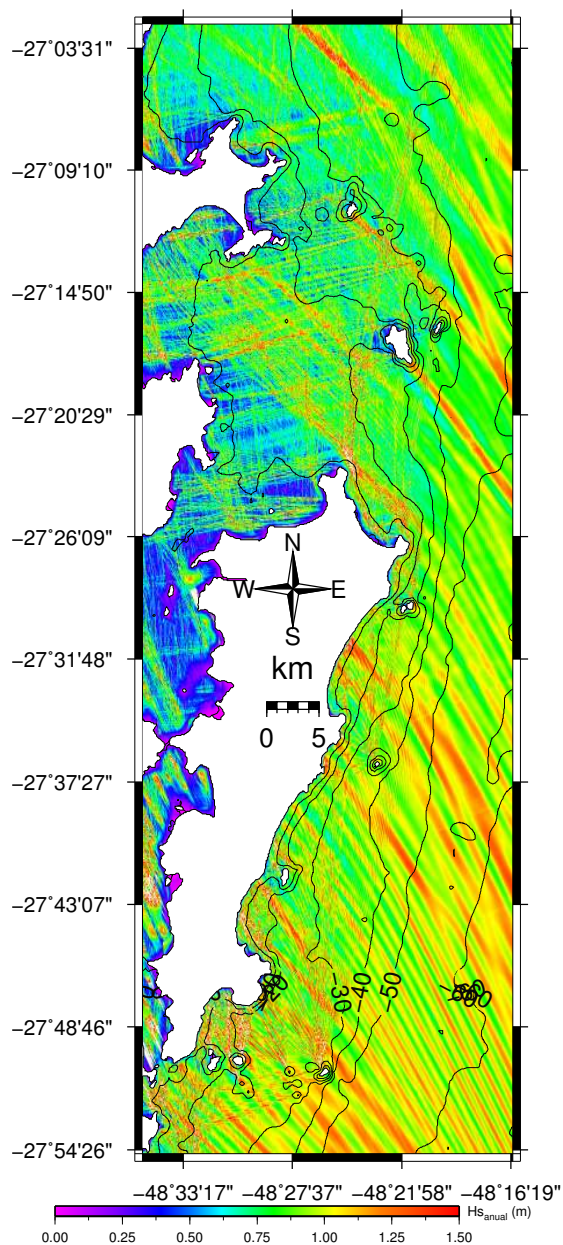


Figura 33 – Índice de exposição às ondas da Ilha de Santa Catarina, $H_{s_{anual}}$.

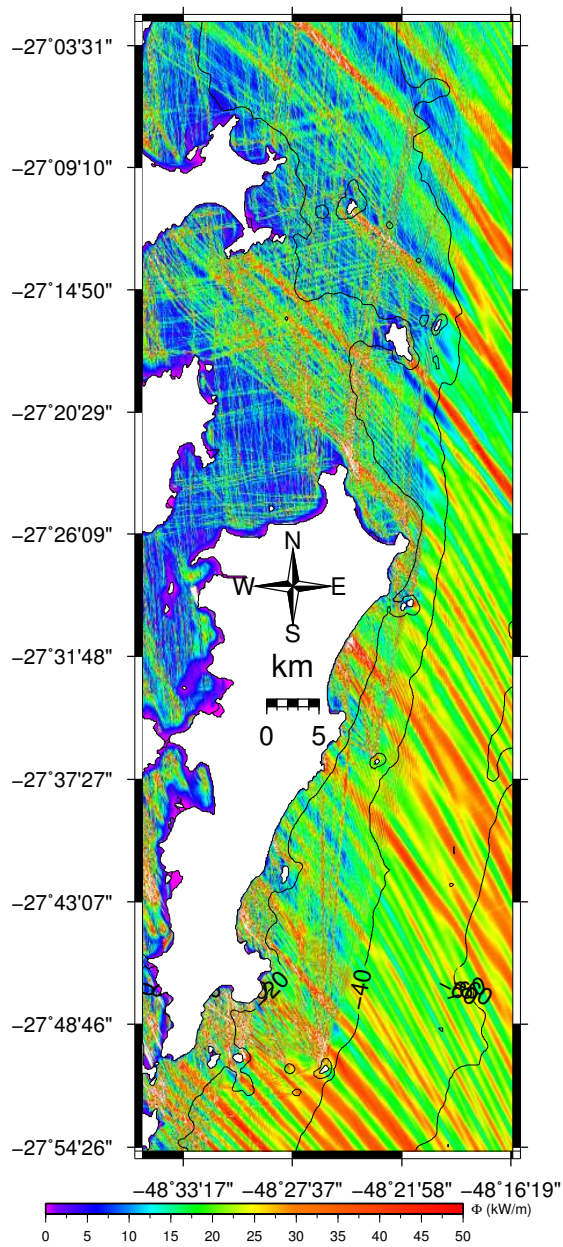


Figura 34 – Índice de exposição às ondas da Ilha de Santa Catarina, ϕ_{anual} .

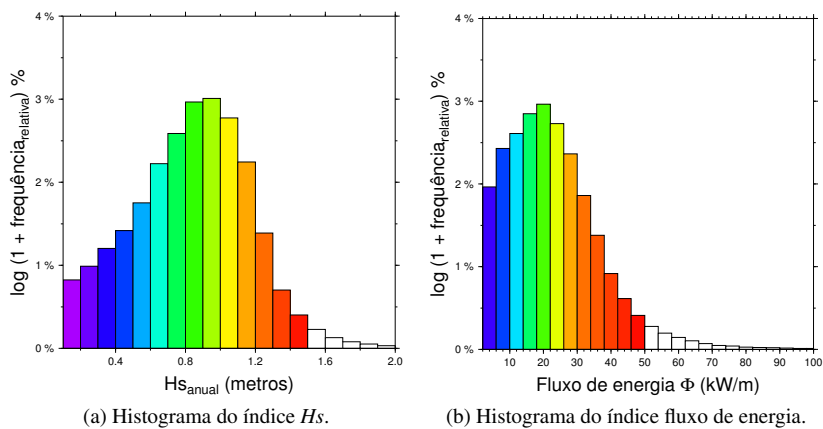


Figura 35 – Histogramas de frequência relativa (logarítmica) para cada índice.

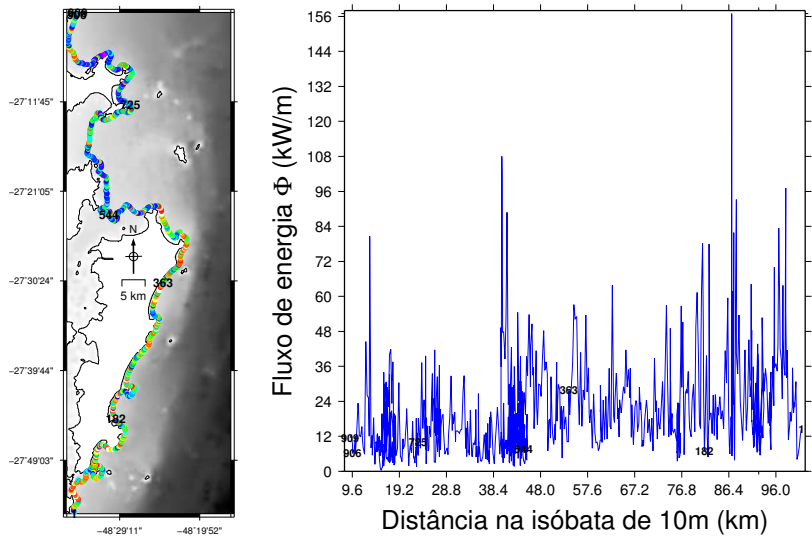


Figura 36 – Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóбата de 10m.

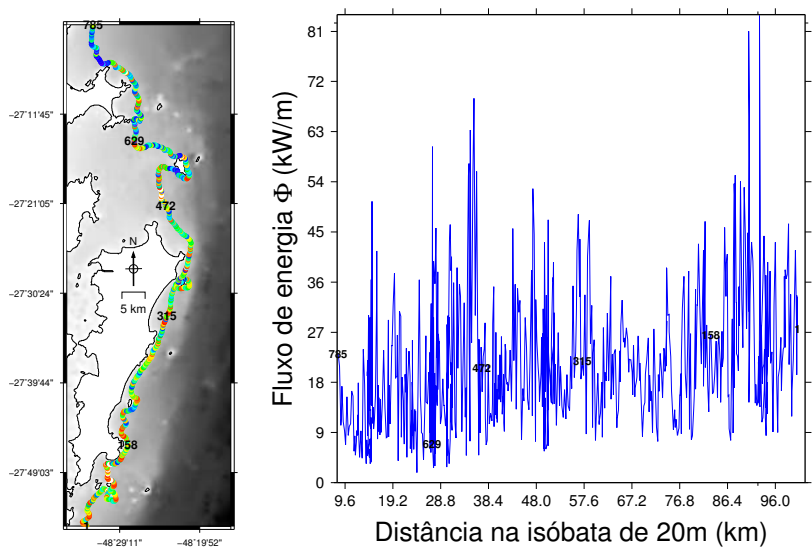


Figura 37 – Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóбата de 20m.

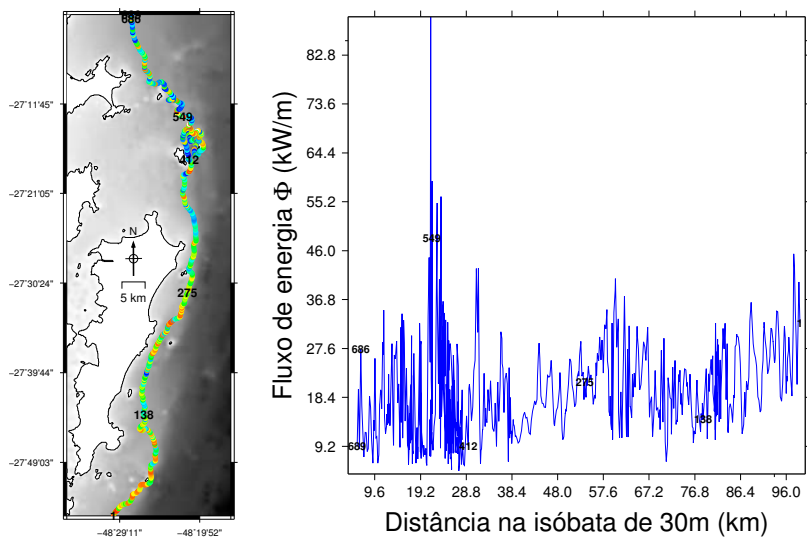


Figura 38 – Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 30m.

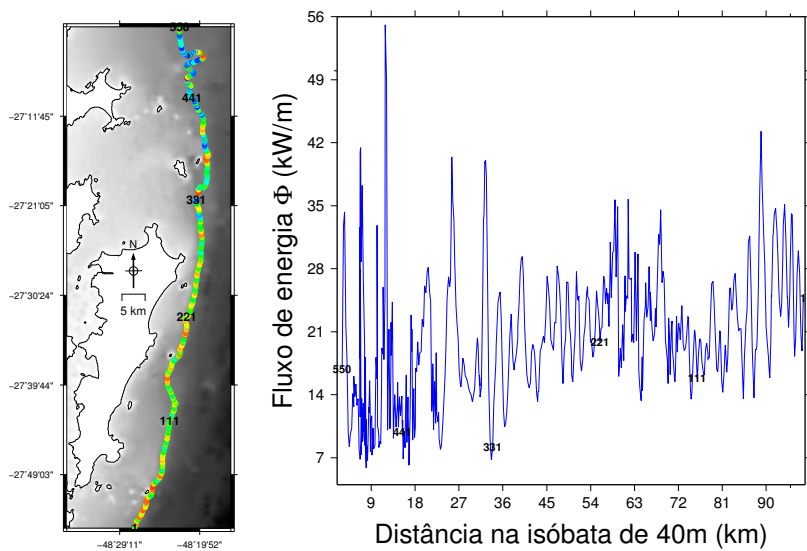


Figura 39 – Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 40m.

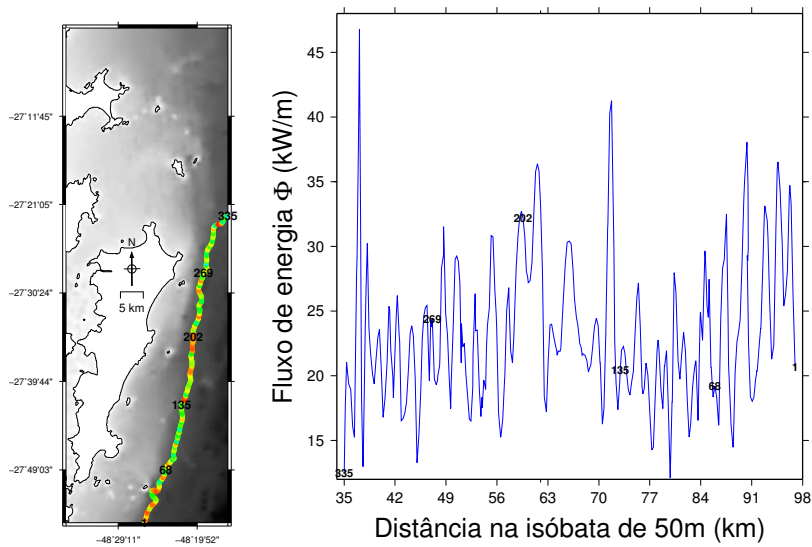


Figura 40 – Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 50m.

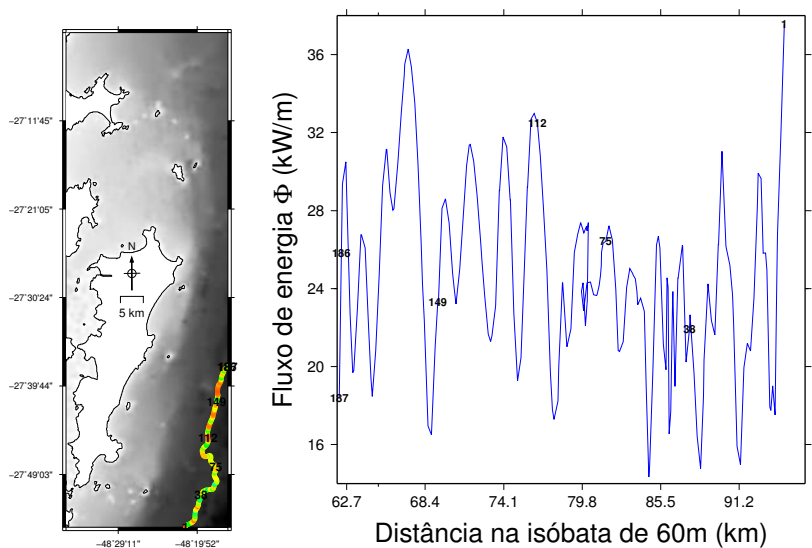


Figura 41 – Mapa e perfil do I.E. ϕ na isóbata de 60m.

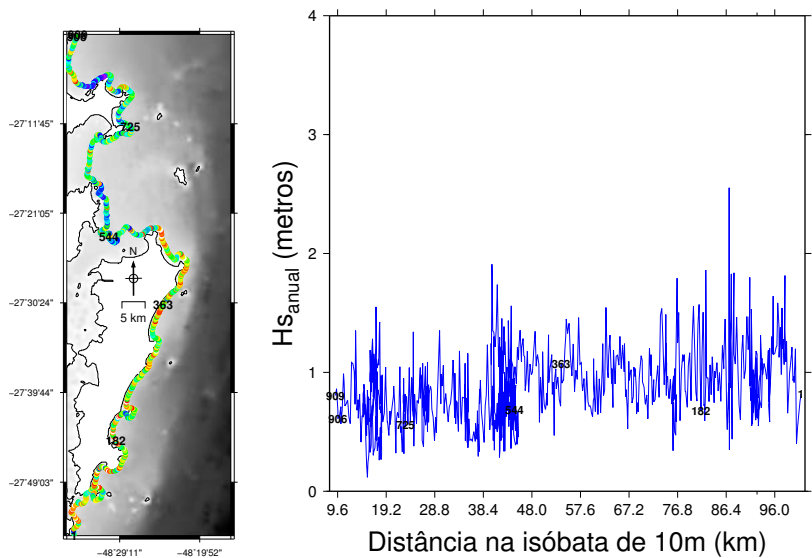


Figura 42 – Mapa e perfil do I.E. H_s na isóбата de 10m.

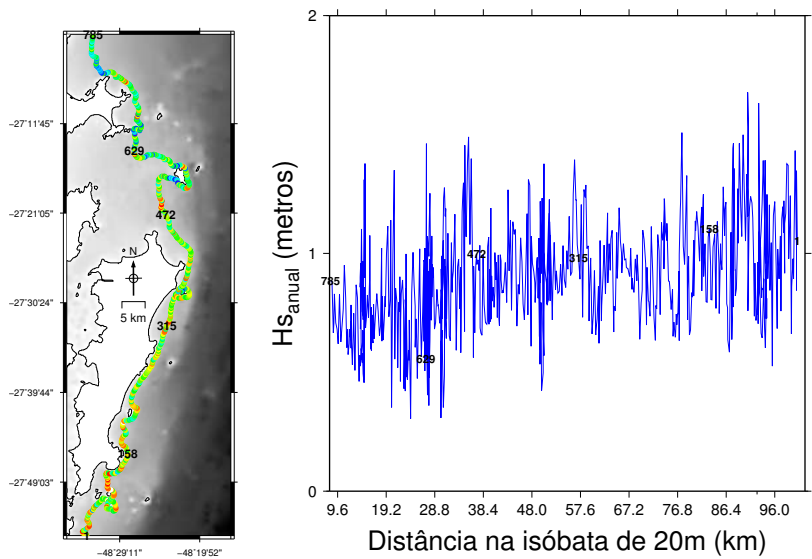


Figura 43 – Mapa e perfil do I.E. H_s na isóбата de 20m.

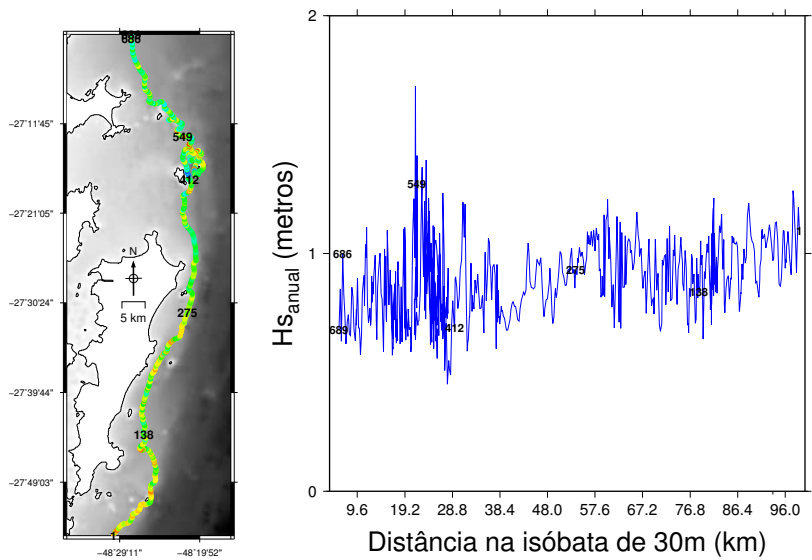


Figura 44 – Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 30m.

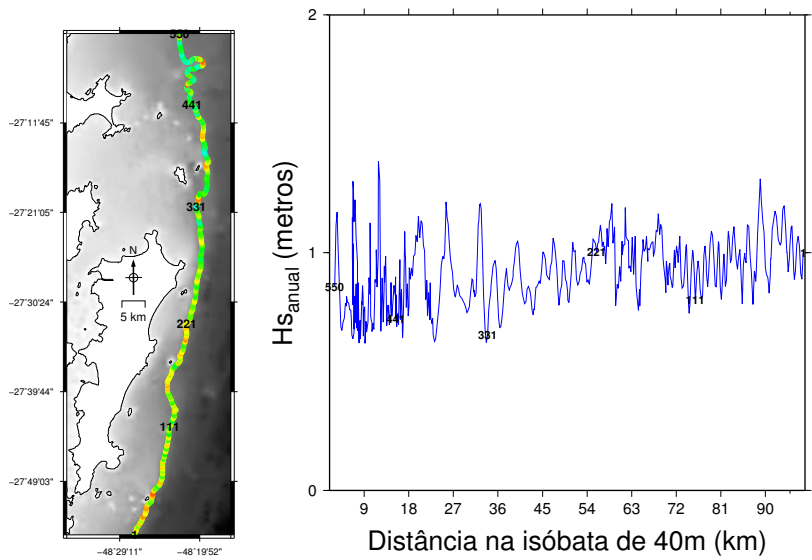


Figura 45 – Mapa e perfil do I.E. H_s na isóbata de 40m.

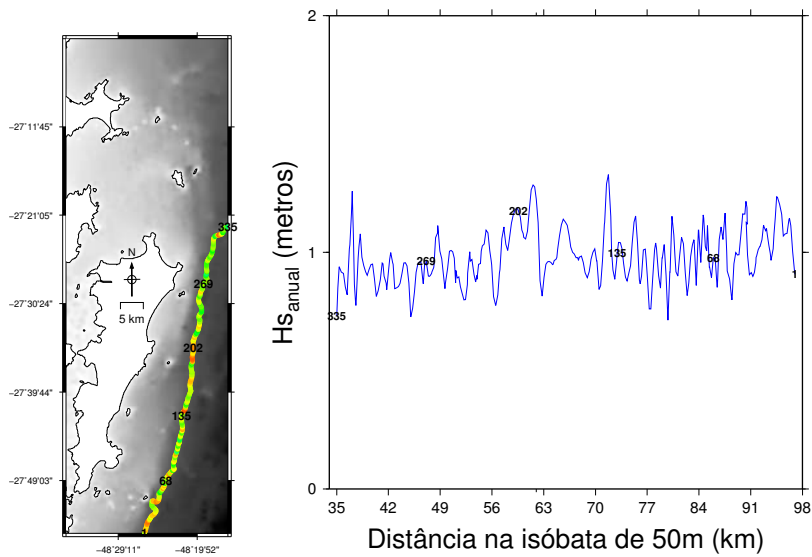


Figura 46 – Mapa e perfil do I.E. H_s na isóбата de 50m.

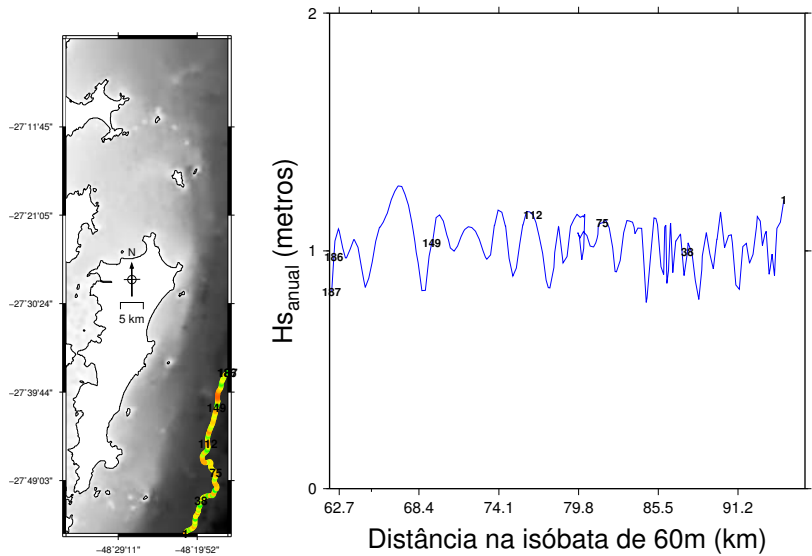


Figura 47 – Mapa e perfil do I.E. H_s na isóбата de 60m.

Para exemplificar, a Figura 48 mostra os valores do índice de exposição às ondas ϕ para os pontos da Tabela 10.

Tabela 10 – Valor do índice para algumas localidades.

Ponto	Longitude (graus)	Latitude (graus)	Índice ϕ kW/m	Localidade
1	-48,514	-27,118	0,10	Porto Belo - Ponta do Araçá 1 (Costão Direito)
2	-48,521	-27,118	4,61	Porto Belo - Ponta do Araçá 2 (Costão Esquerdo)
3	-48,524	-27,122	0,16	Porto Belo - Ponta do Araçá 3 (Caixa D'áço)
4	-48,409	-27,181	0,42	Galés-Lili
5	-48,409	-27,182	1,30	Galés
6	-48,329	-27,268	17,74	Deserta Norte
7	-48,331	-27,271	14,64	Deserta Oeste
8	-48,363	-27,274	56,31 ^a	Arvoredo Saco D'água
9	-48,374	-27,276	0,31	Arvoredo Rancho Norte
10	-48,372	-27,285	2,40	Arvoredo Capim
11	-48,364	-27,29	0,03	Arvoredo Baia da Tartaruga
12	-48,367	-27,294	4,67	Arvoredo Engenho
13	-48,359	-27,298	7,17	Arvoredo Saco do Vidal
14	-48,386	-27,61	21,75	Xavier Oeste
15	-48,388	-27,612	16,91	Xavier Ponta Sul
16	-48,468	-27,692	2,93	Campeche Norte
17	-48,468	-27,7	5,63	Campeche Sul
18	-48,432	-27,846	12,39	Moleques Oeste
19	-48,434	-27,847	15,54	Moleques Sul

^a valor elevado, aparentemente ruído numérico causado pelo uso de uma onda monocromática, e não espectral, para a modelagem.

Pode-se avaliar que, de maneira geral, os locais da Tabela 10 possuem índices ϕ condizentes com a exposição observada na realidade, excetuando-se o ponto *Arvoredo Saco D'água*, devido provavelmente, a ruído numérico na modelagem na zona de linha de costa.

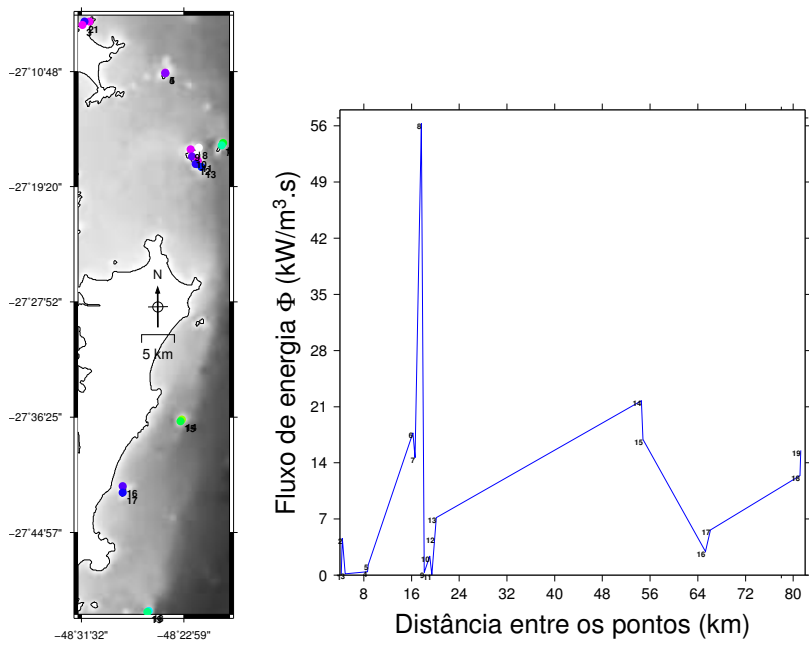


Figura 48 – Exemplo do I.E. ϕ em pontos na zona costeira, mapa e perfil de distâncias.

4 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A metodologia aplicada se mostrou eficaz para o cálculo do índice de exposição às ondas, uma vez que foi possível a representação dos processos físicos relevantes na região. Os algoritmos implementados proporcionaram a obtenção de resultados mais acurados, georreferenciados e de fácil visualização.

Para maior representatividade do índice calculado, seria necessária a utilização do REF/DIF-S, proposta para estudos posteriores, onde a onda propagada é espectral, logo, mais semelhante às ondas que ocorrem na natureza, o que dilui o ruído numérico.

Outro fator importante seria a inclusão dos picos bimodais dos espectros na modelagem e também dos outros sistemas identificados por (ARAÚJO *et al.*, 2003) que não foram incluídos neste trabalho.

Os mapas de **altura significativa de onda** e fluxo de energia hidrodinâmica (ϕ) foram utilizados para sintetizar como a energia de onda incide, em média, na região costeira da Ilha de Santa Catarina. Desta forma a relação entre comunidades ecológicas e a energia hidrodinâmica das ondas pode ser usada na construção de cenários de modelagem ecológica, e estudos afins.

Seja através da Hs_{anual} ou ϕ , foi possível a quantificação dos processos de refração, difração e empinamento das ondas no contexto específico do regime de onda da Ilha de Santa Catarina. Porém são necessários trabalhos futuros para que este índice seja melhorado e acurado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO, C.; FRANCO, D.; MELO, E.; PIMENTA, F. Wave regime characteristics of the southern Brazilian coast. In: *International Conference on Coastal and Port Engineering in Developing Countries, COPEDEC*. [S.l.: s.n.], 2003. v. 6, n. 097, p. 1–15.

BARLETTA, R. C. *Teste e Aplicação de Modelos Parabólicos de Refração-Difração com Ênfase na Propagação de Ondas sobre Parcéis*. 1–137 p. Tese (Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. Disponível em: <http://www.tede.ufsc.br/teses/PGEA0257.pdf>.

DEAN, R.; DALRYMPLE, R. *Water wave mechanics for engineers and scientists*. [S.l.]: World Scientific Pub Co Inc, 1991. 353 p. ISBN 9810204213.

DEAN, R.; DALRYMPLE, R. *Coastal processes with engineering applications*. [S.l.]: Cambridge, 2001. ISBN 0521495350.

DHN. Roteiro: Costa Sul - Do Cabo Frio ao Arroio Chuí. Lagoas dos Patos e Mirim. *Centro de Hidrografia da Marinha*, n. 4, p. 282, 2006. Disponível em: <https://www.mar.mil.br/dhn/chm/publicacao/rotcs/Capa-Pag-Efetivas-Registro-Indice.pdf>.

FRANCO, D.; FILHO, E. Relevância dos mares secundários na caracterização do regime de ondas ao largo da Ilha de Santa Catarina, SC. *semengo.furg.br*, 2008. Disponível em: <http://www.semengo.furg.br/2008/38.pdf>.

KIRBY, J. T.; DALRYMPLE, R. A.; SHI, F. *Combined Refraction / Diffraction Model REF/DIF1 Documentation and User's Manual*.

University of Delaware, Newark: [s.n.], 2002. 166 p.

LIN, P. *Numerical Modelling of Water Waves: An Introduction to Engineers and Scientists*. [S.l.]: Taylor Francis Group, 2008. 504 p. ISBN 0415415780.

MADER, C. *Numerical modeling of water waves*. [S.l.]: CRC, 2004. 288 p. ISBN 0849323118.

ROMEU, M. A. R. *Método operacional para determinação do estado de mar próximo à costa: aplicação à ilha de Santa Catarina*. 1–103 p. Tese (Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal de Santa Catarina) — Universidade Federal de Santa Catarina, 2007. Disponível em: <http://www.tede.ufsc.br/teses/PGEA0277.pdf>.

SILVA, J. C.; FRANCO, D.; FRASSON, H.; MENDES, S.; GODOY, F. B. Modelo Numérico do relevo submerso da região costeira catarinense. 2009.

SOLURI, E.; WOODSON, V. World vector shoreline. *International Hydrographic Review*, v. 67, n. 1, p. 27–36, 1990.

STEWART, R. H. *Introduction to physical oceanography*. Texas: Department of Oceanography, 2008.

STOKER, J. *Water waves: The mathematical theory with applications*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1992. 600 p. ISBN 0471570346.

THOMAS, M. Littoral community structure and zonation on the rocky shores of Bermuda. *Bulletin of Marine Science*, University of Miami-Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, v. 37, n. 3, p. 857–870, 1985. ISSN 0007-4977. Disponível em:

<http://www.ingentaconnect.com/content/umrsmas/bullmar/1985/00000037/00000003/art00006>.

THURMAN, H. Introductory oceanography. Prentice Hall, 1997.

WESSEL, P.; BERCOVICI, D. Interpolation with splines in tension: a Green's function approach. *Mathematical Geology*, Springer, v. 30, n. 1, p. 77–93, 1998. ISSN 0882-8121. Disponível em: <http://www.springerlink.com/index/V7H858Q304465RWH.pdf>.

GLOSSÁRIO

A

altura significativa de onda (H_s) (*i. wave height*) média da terça parte das ondas com maior altura registadas durante o tempo considerado. 16, 21, 23, 25–27, 29, 32, 43, 44, 50–52, 75

C

cluster analysis (*p. análise de aglomerados*) classificação de um conjunto de dados em subgrupos (aglomerados), de modo que os elementos em cada subgrupo compartilhem características comuns. 26–28

D

direção média predominante (θ_p) (*i. average predominant direction*) direção referente ao T_p , que prevalece significativamente e compõe o estado do mar em toda a área de estudo. 23, 25–28, 43, 44

O

ondas superficiais (*i. surface waves*) ondas que se movem ao longo de uma superfície que separa dois meios contrastantes, como acontece na superfície marinha que separa o meio hídrico do meio atmosférico. 13

P

período de pico (T_p) (*i. peak wave period*) período correspondente à frequência com maior densidade espectral, é parâmetro representativo das ondas mais energéticas. 23, 25–29, 43, 52

pista de onda (*i. fetch wave*) distância na qual, o vento pode soprar ininterruptamente em uma direção específica entre dois locais específicos ao longo de uma superfície; suficiente para transmissão de energia em forma de altura significativa de onda. 29

R

regime de onda diferentes estados de mar e suas variabilidades ao longo das estações do ano, evolução no tempo de um campo de ondas com padrões de

recorrência temporal e configurações características de espectro direcional. 13, 25, 30

rotina computacional conjunto de instruções criada em um computador para realizar uma tarefa específica. 32, 43, 50

S

software livre programa de computador que pode ser usado, copiado, estudado, modificado e redistribuído sem restrição. 14, 32

Z

zona costeira (*i. nearshore*) espaço geográfico de interação do ar, mar e terra, incluindo seus recursos renováveis e não-renováveis. 13, 25

**Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Curso de
Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental para a
obtenção do Grau de Engenheiro Sanitarista e Ambiental.**

Orientador: Prof. Dr. Davide Franco

Florianópolis, 2011